



**Escola de Camins**  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports  
UPC BARCELONATECH

## Análisis numérico de vibraciones provocadas en túneles.

Trabajo realizado por:

**Jesús Alberto Moronta Tremols**

Dirigido por:

**Alberto Ledesma Villalba**

**Antonio Lloret Morancho**

Máster en:

**Ingeniería del Terreno**

Barcelona, **Junio 2018**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

**TRABAJO FINAL DE MÁSTER**

## Resumen

El tren es uno de los medios más eficaces y usados para el transporte de personas y mercancías. Éste resulta amigable con el medio ambiente debido a que sus niveles de contaminación son mínimos en comparación con otros medios de transporte.

Cabe destacar que ante el paso de trenes se generan vibraciones que resultan un poco complejo analizarlas, ya que es necesario conocer la fuente de vibración, la propagación de las ondas y la respuesta de las estructuras. La predicción de sus efectos puede realizarse mediante el uso de modelos analíticos, semi-analíticos y empíricos.

El presente trabajo se basa en estudiar la transmisión de las vibraciones generadas por la circulación de trenes mediante el uso de un programa de elementos finitos con el objetivo de conocer su relación con métodos empíricos. Este programa es Plaxis 2D, el cual permite resolver problemas dinámicos.

Inicialmente, se creó una geometría sencilla de suelo en la cual se aplica una carga armónica de 5 Hz en superficie por un tiempo determinado, evaluando rigideces de 100 MPa, 1000 MPa y 10000 MPa. Con esto se buscó conocer el efecto que tienen los coeficientes de Rayleigh  $\alpha$  y  $\beta$  de Plaxis en el coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ ) y el coeficiente de atenuación del material ( $\alpha$ ) del método empírico de Barkan. Luego, con el objetivo de conocer este mismo comportamiento, se modeló el paso de un tren en un túnel de 10 metros de diámetro a diferentes profundidades.

Posteriormente, se procedió a conocer el efecto que tienen las zanjas en la atenuación de vibraciones, modelando una geometría sencilla de suelo con una carga en superficie y otra en profundidad. Se simuló zanjas (alejadas de la fuente) rellenas de bentonita, concreto, abierta y otro material con ciertas propiedades y diferentes profundidades.

Se pudo determinar, ante una carga en superficie, que  $\beta$  de Plaxis es el parámetro que más influye en los coeficientes de Barkan.  $\alpha$  de Plaxis no resulta relevante para los valores de Barkan obtenidos. El coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ ) y el coeficiente de atenuación del material ( $\alpha$ ) de Barkan estuvieron entre 1.26-2.41 y 0.002-0.037 respectivamente. Por otro lado, en un túnel, se obtuvieron valores aleatorios de  $\gamma$  y  $\alpha$  y se pudo determinar que ninguno de los parámetros tenían una tendencia determinada debido a que la estructura del revestimiento hace que el comportamiento del suelo difiera del que tiene en caso de una carga puntual localizada.

En cuanto a las zanjas como método de reducción de vibraciones, se pudo verificar que la profundidad juega un papel muy importante en la atenuación de éstas (mientras más profundidad, más atenuación). Las zanjas abiertas resultaron más eficaces que la de concreto, bentonita y el otro material, reduciendo hasta un 90% las vibraciones.

Finalmente, se pudo comprobar que Plaxis es una herramienta útil para estudiar el comportamiento de vibraciones provocadas por el tránsito ferroviario.

## Abstract

The trains are one of the most efficient means of transport of people and goods. It is friendly to the environment because its pollution levels are minimal compared to other means of transportation.

It should be noted that trains generate vibrations. The analysis of these vibrations is complex and it is necessary to know the source of vibration, the propagation of the waves and the response of the structures. The prediction of its effects can be carried out through the use of analytical, semi-analytical and empirical models.

The present work is based on studying the transmission of vibrations generated by train circulation through the use of a finite element program in order to know its relationship with empirical methods. The program used is Plaxis 2D, which allows to solve dynamic problems.

Initially, a simple soil geometry was created in which a harmonic load of 5 Hz is applied on the surface, considering 100 MPa, 1000 MPa and 10000 MPa of stiffness. This was performed in order to know the effect of the Rayleigh coefficients  $\alpha$  and  $\beta$  of Plaxis on the geometric attenuation coefficient ( $\gamma$ ) and the material attenuation coefficients ( $\alpha$ ) of Barkan's empirical method. Then, to analyze this effect, the circulation of a train in a tunnel with a diameter of 10 meters was modeled at different depths.

Then, the effect of trenches on the attenuation of vibrations generated by a surface load and depth load was studied. Trenches filled with bentonite, concrete, open and other material with certain properties were modeled. These trenches were far from the source and at different depths.

It was possible to determine, for the case of a surface load, that  $\beta$  of Plaxis is the parameter that influences most in Barkan's coefficients.  $\alpha$  of Plaxis is not relevant for the Barkan values obtained. The geometric attenuation coefficient ( $\gamma$ ) and the material attenuation coefficient ( $\alpha$ ) of Barkan were between 1.26-2.41 and 0.002-0.037 respectively. On the other hand, in a tunnel, random values of  $\gamma$  and  $\alpha$  were obtained and it was found that none of the parameters had a particular tendency because of the effect of the tunnel lining, that departs from a point load on a halfspace geometry.

Regarding the trenches as a method of vibration reduction, it was possible to verify that the depth plays a very important role in the attenuation of these (the more depth, the more attenuation). Open trenches were more effective than the concrete, bentonite and other material, reducing vibrations up to 90%.

Finally, it was found that Plaxis is a useful tool to study the behavior of vibrations caused by rail traffic.

## **Agradecimientos**

En primer lugar le doy gracias a Dios por darme el enfoque y la fortaleza para desarrollar esta investigación. Igualmente por permitirme recuperar mi salud y regresar a Barcelona para concluir este máster.

Quiero expresar un profundo agradecimiento a mis tutores Alberto Ledesma Villalba y Antonio Lloret Morancho por ser una gran guía, por su tiempo y por estar siempre presente para responder mis preguntas y aclarar mis dudas.

A mis padres Jesús y María y a mis hermanos Omar e Iván por estar siempre pendiente de mí a pesar de la distancia. Gracias por apoyarme en todas las decisiones que tomo.

Igualmente a mi abuelo y a mis abuelas, a mis tíos/as y a mis primos/as por su apoyo y el cariño que siempre me brindan.

Al Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología de la República Dominicana por implementar el sistema de becas internacionales y por permitir que yo siga creciendo en el ámbito profesional.

A mis amigos de República Dominicana y a las nuevas amistades que tuve el placer de conocer en esta etapa de mi vida.

Finalmente, gracias a todos mis profesores, compañeros y personal del Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña.

## Índice

<b>Capítulo 1: Introducción</b>	7
1.1. Introducción	7
1.2. Antecedentes	9
1.2.1. Estudios experimentales	9
1.2.2. Desarrollo de modelos y otros estudios para el análisis de vibraciones	11
1.3. Objetivos	14
1.3.1. Objetivo general	14
1.3.2. Objetivos específicos	14
1.4. Motivación	14
1.5. Estructura del trabajo de investigación	15
<b>Capítulo 2: Propagación de vibraciones en el terreno</b>	16
2.1. Fuente de vibraciones	16
2.2. Modelo de Barkan	17
2.3. Estudio reciente. Ángel Sánchez; Joan Cardona y otros colaboradores	19
2.4. Métodos de reducción de vibraciones	21
2.4.1. En la fuente de vibración	22
2.4.2. Entre la fuente y el receptor	22
2.4.3. En el receptor	23
2.4.4. Estudio reciente. Erkan Çelebi, y otros colaboradores	23
2.5. Umbral de vibraciones y algunas normativas	26
2.5.1. Umbral de vibraciones	26
2.5.2. Normativas	28
<b>Capítulo 3: Análisis numérico: Programas PLAXIS</b>	29
3.1. Introducción	29
3.2. Modelos constitutivos	30
3.3. Módulo dinámico	32
3.4. Coeficientes de Rayleigh	32
3.5. Integración temporal y pasos de tiempo	34
3.6. Cargas dinámicas	35
3.7. Condiciones de contorno	36
<b>Capítulo 4: Presentación de los modelos y análisis de resultados</b>	37
4.1. Introducción	37

<b>4.2. Primer modelo: carga en superficie .....</b>	<b>38</b>
4.2.1. Consideraciones generales .....	38
4.2.2. Geometría del modelo .....	39
4.2.3. Propiedades de los materiales.....	40
4.2.4. Fases de cálculo.....	41
4.2.5. Resultados .....	42
4.2.5.1. Influencia de la rigidez (100 MPa) .....	43
4.2.5.2. Influencia de la rigidez (1000 MPa) .....	46
4.2.5.3. Influencia de la rigidez (10000 MPa) .....	48
4.2.5.4. Ajustes realizados.....	51
<b>4.3. Segundo modelo: paso de un tren en un túnel .....</b>	<b>55</b>
4.3.1. Consideraciones generales .....	55
4.3.2. Geometría del modelo .....	55
4.3.3. Propiedades de los materiales.....	56
4.3.4. Fases de cálculo.....	58
4.3.5. Resultados .....	59
4.3.5.1. Túnel a 15 metros de profundidad .....	59
4.3.5.2. Túnel a 30 metros de profundidad .....	60
4.3.5.3. Túnel a 45 metros de profundidad .....	61
<b>4.4. Tercer modelo: método de reducción de vibraciones.....</b>	<b>62</b>
4.4.1. Consideraciones generales .....	62
4.4.2. Geometría del modelo .....	63
4.4.3. Propiedades de los materiales.....	64
4.4.4. Fases de cálculo.....	64
4.4.5. Resultados .....	66
4.4.5.1. Carga en superficie. ....	66
4.4.5.2. Carga a 10 metros de profundidad.....	69
<b>Capítulo 5: Conclusiones .....</b>	<b>72</b>
<b>Capítulo 6: Futuras líneas de investigación .....</b>	<b>74</b>
<b>Capítulo 7: Bibliografía .....</b>	<b>75</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>77</b>

# Capítulo 1: Introducción

## 1.1. Introducción

El transporte ferroviario, tanto en superficie como subterráneo representa uno de los medios de transporte más seguros. Cabe destacar que el paso de un tren representa una carga dinámica y el comportamiento del suelo ante esta condición de carga puede variar en función de sus propiedades y de su estado inicial. Esta carga dinámica se traduce en la generación de vibraciones las cuales afectan al entorno. Éstas tienden a disminuir a medida que se aleja de la fuente debido a varios factores: la expansión de la onda en el terreno y la disipación de energía en el terreno.

Las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes se han estudiado desde mediados del siglo XIX. En 1846, South publicó estudios realizados sobre el nivel de vibraciones inducidas por un ferrocarril en el túnel de Watford. En 1929, Hyde y Lintern estudiaron la caracterización de las vibraciones ocasionadas en la estación Central de Londres y su propagación hasta viviendas cercanas a Hyde Park. En 1995 Krylov y sus colaboradores presentaron un método analítico para representar la parte cuasi-estática de la fuerza transmitida por el tren al suelo, a través del rail y las traviesas (Galvín Barrera, 2007).

Cabe destacar que el rango de frecuencias debido al paso de trenes se encuentra entre 4-50 hZ y en zonas urbanas estas frecuencias pueden generar vibraciones que molesten a las personas y afectar las estructuras cercanas. Es por eso que en las últimas décadas se han desarrollado métodos para disminuir de una manera efectiva las vibraciones. Uno de estos métodos es el aislamiento a partir de barreras. Éstas se pueden colocar en la fuente, entre la fuente y el receptor o en el receptor. El uso de zanjas rellenas con material menos rígido que el suelo o zanjas abiertas (aunque limitadas a pequeñas profundidades), resulta efectivo para atenuar las vibraciones. El uso de un material más rígido que el suelo permite llegar a profundidades mayores (Coulier et al., 2015).

Es importante conocer que la construcción de túneles ferroviarios va en aumento en zonas urbanas y resulta útil tener una herramienta para estudiar el comportamiento de las vibraciones causadas por el paso de trenes.

La predicción del efecto de las vibraciones puede realizarse mediante el uso de modelos analíticos y semi-analíticos. Existen modelos empíricos que se basan en observaciones y medidas tomadas en las vías ferroviarias existentes. Uno de los modelos empíricos más utilizado es el de Barkan, el cual que permite conocer las velocidades en un punto a partir de un punto de origen donde ocurre la vibración.

Actualmente los métodos numéricos resultan una herramienta útil para entender el comportamiento de las vibraciones. En los últimos años se han desarrollado programas basados en elementos finitos que resuelven la ecuación de movimiento y permiten estudiar el comportamiento de las vibraciones.

El presente trabajo se basa en estudiar la transmisión de las vibraciones generadas por la circulación de trenes mediante el uso de un programa de elementos finitos llamado Plaxis, en donde se pretende estudiar el efecto de la geometría y las propiedades del suelo.

Inicialmente se creará una geometría sencilla en donde se modelará una carga armónica en superficie y los resultados se compararán con el método empírico de Barkan. Se conseguirá estudiar el efecto que tiene la rigidez y los coeficientes de Rayleigh de Plaxis en la variación del coeficiente de atenuación geométrica y el coeficiente de atenuación del material en la propagación de vibraciones en la expresión de Barkan.

Por otro lado, se buscará estudiar la expresión de Barkan en un túnel, estudiando nuevamente la relación de la rigidez y los coeficientes de Rayleigh en este método.

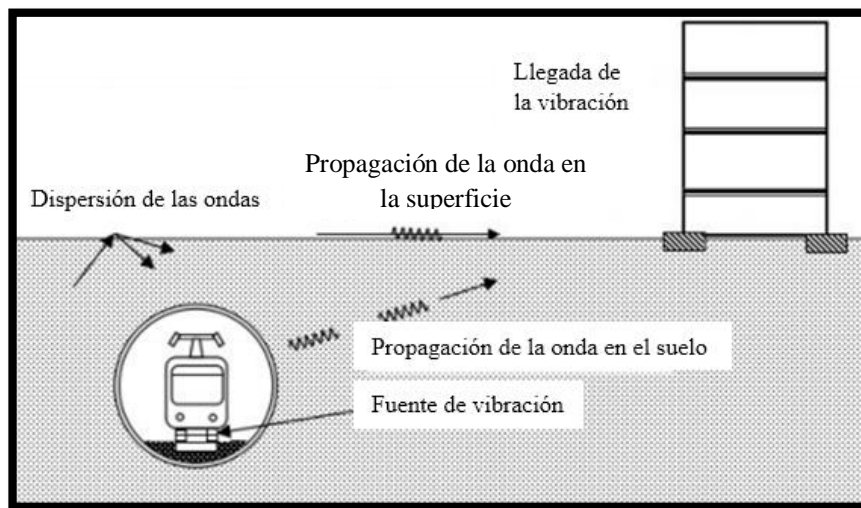
Finalmente, se conocerá también el efecto de atenuación de las vibraciones mediante la construcción de zanjas rellenas de bentonita, concreto, otro material y una zanja abierta a diferentes profundidades. Estas zanjas se encontrarán a cierta distancia de la fuente y se evaluarán la relación de las aceleraciones máxima vertical de la zanja y la aceleración máxima vertical sin zanja con el objetivo de saber cuál es más eficiente en la atenuación de vibraciones.



## 1.2. Antecedentes

Uno de los inconvenientes que presenta el transporte ferroviario son las vibraciones que se generan. Éstas pueden ser nocivas para las personas y para las estructuras aledañas debido a que pueden causar desplazamientos y afectar los elementos de la vía.

Las vibraciones provocadas por el paso ferroviario en túneles tienen su origen en las fuerzas dinámicas generadas en la zona de contacto entre la rueda y el carril, por las irregularidades en la vía o por la variación del punto de aplicación de la carga ferroviaria. (Fernández Ruíz, 2007). Estas fuerzas hacen que las ondas de vibración se desplacen a través del suelo siguiendo una trayectoria hasta llegar a un receptor (ver Figura 1).



**Figura 1.** Propagación de ondas en un túnel (Yao Kun, 2016)

### 1.2.1. Estudios experimentales

Para conocer el comportamiento de las vibraciones asociadas al tráfico ferroviario es necesario conocer las cargas estáticas y dinámicas aplicadas por el ferrocarril en la vía. Por lo tanto, es importante estudiar cómo la carga se transmitirá a la vía, al suelo, al revestimiento y la respuesta de las estructuras ante estas vibraciones. Es por eso que las vibraciones se han estudiado desde mediados de siglo XIX. En la tabla 1 se pueden visualizar algunos estudios experimentales realizados.

**Tabla 1.** Estudios experimentales de vibraciones provocadas por el paso de trenes  
(Galvín Barrera, 2007).

Año	Autor	Estudios realizados
1846	South	Nivel de vibraciones inducidas por un ferrocarril en el túnel de Watford.
1929	Hyde y Lintern	Caracterización de las vibraciones ocasionadas en la estación Central de Londres y su propagación hasta viviendas cercanas a Hyde Park.
1979	Dawn y Stanworth	Nivel de vibraciones en una estructura situada a 42 m de la vía, estudiando el efecto de la velocidad y el tipo de tren.
1983	Dawn	Efecto que la frecuencia de paso por traviesas tiene en el nivel de las vibraciones inducidas en el terreno.
1983	Melke y Kraemer	Medición de las aceleraciones de vibraciones originadas por un tranvía en vía, suelo y en un túnel.
1998	Lai CG. y Rix GJ	Obtención de una serie de medidas que valoraron el efecto del tren de alta velocidad tanto en el terreno como en el interior de algunas estructuras cercanas.
2005	Xia H. Zhang N	Estudio del comportamiento dinámico del balasto midiendo la respuesta inducida por trenes de pasajeros y mercancías circulando a velocidades de 90 y 60 km/h, respectivamente. Se obtuvieron las respuestas ante el paso del ferrocarril de dos edificios cercanos a la vía.
2005	Ángel Sánchez; Joan Cardona y otros colaboradores	Estudio experimental con el objetivo de utilizar la ecuación de Barkan, realizando medidas de vibraciones causadas por el paso de trenes para diferentes características constructivas
2009	P. Galvín y J. Domínguez	Análisis experimental y numérico de las vibraciones causadas por trenes de alta velocidad en la línea Córdoba-Málaga.
2012	Erkan Çelebi y Göktepe	Análisis no lineal 2D de la evaluación del rendimiento de las barreras de ondas inducidas por un ferrocarril.

### **1.2.2. Desarrollo de modelos y otros estudios para el análisis de vibraciones**

Desde principio de los años sesenta han surgido varios modelos aproximados para obtener el nivel de vibraciones y el tipo de propagación de ondas inducido en el suelo por el paso de trenes. Sin embargo el estudio de estas vibraciones requiere un modelo que considere la interacción suelo-estructura, donde se pueda conocer la caracterización de la fuente de vibración, la propagación de la onda y respuesta de la estructura

Los modelos desarrollados consisten en modelos analíticos, semi-analíticos y numéricos y han permitido dar una aproximación del comportamiento de las vibraciones y la propagación de ondas en el terreno debido al paso de trenes.

En el año 1960 D. Barkan propuso un modelo empírico que relaciona las amplitudes de las vibraciones en un punto de un semi-espacio homogéneo a una distancia  $r_a$  de la fuente con otro punto tomado a una distancia  $r_b$ . Luego, en el 1975 Ungar y Bender presentaron un método semi-analítico para estimar la atenuación de las vibraciones a partir de una expresión que relaciona la atenuación que sufre desde la fuente, la atenuación debida a pérdidas internas en el suelo y la roca y la atenuación debido al cambio de suelo.

Gutowski y Dym, en 1976, propusieron un modelo en el que el tren se representaba como una carga puntual o como una línea de carga. La atenuación del nivel de vibraciones fue estudiada para ambos modelos de cargas y concluyeron que si se usa un modelo en el que el tren se modela como una carga lineal, el mecanismo de atenuación del suelo puede limitarse a lo interno del material, despreciando el amortiguamiento geométrico. (Galvín Barrera, 2007).

En el año 1979, hubo investigaciones importantes. Por ejemplo, Verhas comparó los resultados del estudio de Gutowski y Dym empleando ambos modelos de carga concluyendo que para obtener de un modo preciso el nivel de vibraciones inducidas por el paso del tren, ambos mecanismos de atenuación deben ser considerados. Más adelante, en 1980, Kurzweil propuso una expresión analítica para obtener el nivel de vibraciones en estructuras cercanas al túnel.

En la Tabla 2 se presentan algunos modelos desarrollados para el estudio de vibraciones.

**Tabla 2.** Algunos modelos desarrollados para el estudio de vibraciones (Galvín Barrera, 2007)

Año	Autor	Modelo	Modelo realizado
<b>1980</b>	US Federal Transit Authority	Empírico	Modelo para determinar la trayectoria de propagación de las ondas y la respuesta del receptor. Éste se basa en ensayos de penetración.
<b>1995</b>	Krylov	Analítico	Modelo para representar la parte cuasi-estática de la fuerza transmitida por el tren al suelo, a través del rail y las traviesas.
<b>1996</b>	Jones y Block	Analítico	Presentaron un modelo en el que toman en cuenta la carga cuasi-estática además de que incluye el efecto de las irregularidades del rail y las ruedas. Obtuvieron experimentalmente la respuesta vertical de las traviesas y la respuesta vertical y transversal de un punto del terreno.
<b>2000</b>	Dieterman, Metrikine y Popp	Analítico	Desarrollaron un modelo que permite considerar la interacción entre la vía y el suelo. Suponen que la geometría del problema es homogénea en la dirección longitudinal de la vía. Se aplica la transformada de Fourier para desarrollar la formulación en el dominio de la frecuencia y número de onda.
<b>2004</b>	Gupta, Hussein, Degrande y Hunt, & Clouteau	Semi-analítico	Desarrollaron un modelo llamado Pipe-in-pipe. Este es un modelo tridimensional que representa la interacción dinámica entre el túnel y el suelo que se encuentra a su alrededor.
<b>2009</b>	P. Galvín y J. Domínguez	Numérico	Validaron los valores experimentales de vibraciones a partir de un modelo numérico basado en el método de elementos de contorno (BEM) y método de elementos finitos (FEM). Este fue utilizado en la predicción de las vibraciones producidas por el paso de trenes de alta velocidad de la línea Córdoba-Málaga.
<b>2012</b>	Erkan Çelebi y Göktepe	Numérico	El objetivo de este análisis numérico consistió en conocer el comportamiento de las vibraciones ante el paso de un tren a 180 km/h y 360 km/h, además de conocer el efecto que tienen las barreras para atenuar las vibraciones.

## Métodos numéricos

En los últimos años, con el desarrollo de la tecnología informática, se ha incrementado la aplicación de los métodos numéricos capaces de estudiar geometrías complejas, resolver sistemas de ecuaciones y estudiar el comportamiento dinámico del problema que se modele. Por lo tanto, los métodos numéricos juegan un papel importante en el estudio de las vibraciones.

Los métodos numéricos utilizados para tratar y resolver de forma aproximada este tipo de problemas son el de elementos finitos (FEM), diferencias finitas (FDM), elementos de contorno (BEM) y modelos híbridos FEM/BEM. Cabe destacar que su aplicabilidad dependerá si es un medio continuo o discontinuo.

El método de elementos finitos (FEM) es un método adecuado para simular geometrías complejas. En éste, se divide el medio en elementos triangulares y permite resolver ecuaciones diferenciales para llegar a una solución general.

Para llegar a la solución, se define la geometría del problema y las condiciones iniciales. Además se establecen las propiedades del terreno y los elementos que caracterizan al medio (incluyendo las cargas). Las propiedades son determinadas a partir de ensayos de laboratorio y el espectro del tren se determina a partir de un modelo analítico. Los resultados se pueden comparar con medidas tomadas in situ por medio de acelerómetros. (Wanga & Martin, 2011).

El método de los elementos de contorno (BEM) es uno de los métodos más empleados para el estudio de vibraciones causada por el paso de trenes debido a su menor coste computacional. Este método usa las condiciones de contorno dadas y las usa para resolver una ecuación integral en la frontera, en lugar de tomar valores en todo el espacio definido por una ecuación diferencial parcial (Fernández, 2014).

La desventaja del método de los elementos de contorno radica en que no resulta factible para modelar geometrías irregulares, terrenos blandos y cimentaciones debido a un posible comportamiento no lineal (Wanga & Martin, 2011). Es por eso que han surgido el modelo híbrido FEM/BEM.

Existen otros métodos que ha arrojado buenos resultados, tanto para medios continuos y discontinuos (Wanga & Martin, 2011):

- El teorema de reciprocidad dinámica Betti-Rayleigh, utiliza las funciones de Green para un semi-espacio homogéneo o estratificado.
- El método de elementos espectrales, permite estudiar configuraciones complicadas y tiene mayor precisión que los FEM o FDM. Éste incluye la interacción dinámica suelo-estructura.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Estudiar la transmisión de las vibraciones generadas por la circulación de trenes mediante el uso de Plaxis, estudiando el efecto de los coeficientes de Rayleigh ( $\alpha$  y  $\beta$ ) en el coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ ) y el coeficiente de atenuación del material ( $\alpha$ ) del método empírico de Barkan.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Conocer los métodos numéricos, métodos empíricos y las normativas que involucren la transmisión de vibraciones generadas por la circulación de trenes en túneles
- Comparar la expresión de Barkan ante una condición de carga en superficie y en un túnel a diferentes profundidades, conociendo a la vez el efecto de la rigidez.
- Estudiar el efecto de zanjas (con diferentes materiales) para atenuar las vibraciones en el suelo.

## **1.4. Motivación**

La motivación principal de esta investigación es profundizar el empleo de métodos numéricos en el área de la ingeniería geotécnica, especialmente en la dinámica de suelos. Esto con el objetivo de estudiar la transmisión de las vibraciones causadas por el paso de trenes

En zonas urbanas, la predicción del efecto de las vibraciones provocadas en túneles sobre los edificios cercanos se suele realizar mediante el uso de formulaciones empíricas y tener una herramienta como son los métodos numéricos resultaría útil para entender el comportamiento de estas vibraciones.

Por otro lado, estudiar el efecto de elementos capaces de atenuar las vibraciones debido al paso de trenes como son las zanjas, resultan de gran interés para mitigar daños y molestias en las personas.

Finalmente, es importante conocer que las vibraciones se encuentra dentro de los umbrales límites establecidos en las normas.

## 1.5. Estructura del trabajo de investigación

El presente trabajo estará dividido en varios capítulos.

En el presente capítulo se conocen los objetivos, la motivación del trabajo y los antecedentes del tema. También se conocen los métodos analíticos, semi-analíticos y empíricos por los cuales se estudia el comportamiento de las vibraciones.

El segundo capítulo tratará sobre propagación de vibraciones en el terreno. Se abarcará también las fuentes de vibraciones, además del método empírico de Barkan y casos recientes relacionados con éste. También se explicará acerca de algunos métodos utilizados para atenuar vibraciones. Por último se presentarán brevemente las normativas que regulan el efecto de las vibraciones en estructuras y personas.

En el tercer capítulo se describe el programa de elementos finitos Plaxis, especialmente el módulo dinámico. Se explica el funcionamiento, los modelos constitutivos y las ecuaciones que este programa resuelve. Además tratará sobre los pasos de tiempo y las condiciones de contorno que se deben tomar en cuenta en problemas dinámicos.

El cuarto capítulo se enfocará en los modelos realizados para el caso de estudio:

1. En el primer modelo se creará una geometría sencilla de suelo y se simula una carga armónica en superficie tomando en cuenta diferentes rigideces de suelo.
2. En el segundo modelo se creará la misma geometría del caso anterior y se construirá un túnel de 10 metros de diámetro en el cual se simulará el paso de un tren a partir de una carga armónica. Esto se hará para diferentes profundidades y tomando en cuenta una sola rigidez.
3. El tercer modelo consistirá en un método de reducción de vibraciones. Se construirá una zanja (con diferentes materiales de relleno) a distintas profundidades y a cierta distancia de una carga en superficie. Se estudiará el comportamiento de ésta en la atenuación de las vibraciones. Este modelo también se realizará para una carga en profundidad.

En los resultados se describirá el comportamiento de las aceleraciones y las velocidades verticales en el tiempo. Además se estudiará la variación del coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ ) y el coeficiente de atenuación del material ( $\alpha$ ) del método empírico de Barkan, conociendo el efecto de los parámetros de Plaxis introducidos.

Finalmente, se presentarán las conclusiones y se establecerán futuras líneas de investigación.

## Capítulo 2: Propagación de vibraciones en el terreno

### 2.1. Fuente de vibraciones

Las vibraciones generadas por trenes tienen su origen en la interacción entre la vía y el tren cuando está en movimiento. Hall Lars (2003) planteó que los principales factores que influyen en el nivel y propagación de las vibraciones dependen de:

- Las ondas de esfuerzo inducidas por la respuesta de la vía férrea.
  - Carga del eje.
  - Separación de los ejes de las ruedas.
  - Velocidad del tren.
- El origen de la vibración en la interfaz rueda-riel.
  - Inestabilidad del tren.
  - Propiedades dinámicas del tren.
  - Defectos de la ruedas.
  - Desalineación de los motores.
  - Aceleración y desaceleración del tren.
- Las discontinuidades en la vía.
  - Defectos de los rieles (desigualdades, ondulaciones).
  - Espaciamiento de las juntas de los rieles.
  - Cambios de dirección.
  - Curvas.
- Las características del terreno.
  - Geometría, rigidez y el espaciado entre traviesas.
  - Geometría, rigidez y heterogeneidad del balasto.
  - Rigidez y geometría del terreno.

Cabe destacar que las vibraciones generadas causan molestias debido a su propagación a estructuras cercanas. Además provocan desplazamientos en el terreno y afectan los elementos de la vía. Es por eso que existen normas que regulan los niveles de vibraciones, como por ejemplo la DIN 4150 que toma en cuenta las vibraciones en edificios y el efecto que tiene en los seres humanos dentro de éstos.



## 2.2. Modelo de Barkan

El modelo de Barkan es el modelo empírico más utilizado para el análisis de la propagación de vibraciones. Éste fue formulado por Barkan en el año 1962 y caracteriza la propagación de vibraciones en un semi-espacio homogéneo según la expresión 1. Esta expresión relaciona las amplitudes de las vibraciones en un punto de un semi-espacio homogéneo a una distancia  $r_a$  de la fuente con otro punto tomado a una distancia  $r_b$  mediante la expresión (Sánchez et al., 2005).

$$V_b = V_a \left( \frac{r_a}{r_b} \right)^\gamma e^{\alpha(r_a - r_b)} \quad (1)$$

Donde:

- $V_a$  y  $V_b$ : valores de amplitud de la velocidad en los puntos situados a las distancias  $r_a$  y  $r_b$  de la fuente.
- $\gamma$ : coeficiente de atenuación geométrica
- $\alpha$ : coeficiente de atenuación del material.

Es importante tener en cuenta que las amplitudes de las ondas disminuyen con la distancia. Esta atenuación se debe a varios factores como son la velocidad, el tipo y las propiedades del suelo. En este proceso intervienen dos fenómenos: la atenuación geométrica ( $\gamma$ ) y la atenuación del material ( $\alpha$ ).

La atenuación geométrica ( $\gamma$ ) es debida a la disminución de energía con la distancia a la fuente, y se puede determinar a partir del tipo de onda de propagación, el tipo de fuente y la localización de ésta como se puede visualizar en la Tabla 3 (Sánchez et al. 2005).

El coeficiente de atenuación del material ( $\alpha$ ) se debe a la disipación de energía en el suelo. Es decir, la fricción y cohesión en el suelo juegan un papel dominante debido a que éste no es perfectamente elástico. Por ejemplo, la arena húmeda atenúa menos que la arena seca debido a que el agua intersticial entre las partículas de arena absorbe una porción significativa de energía de compresión (Sánchez et al., 2005).

Las vibraciones se propagan a través del terreno hasta que llegan a un receptor. En este proceso predominan dos tipos de ondas: las ondas de volumen (ondas P y S) y las ondas de superficie u ondas Rayleigh (Eitzenberger, 2008).

**Tabla 3.** Coeficiente teórico de atenuación geométrica para varias fuentes y tipos de onda (Sánchez et al., 2005).

Tipo de fuente	Onda	Localización	$\gamma$
Puntual	Rayleigh	Superficie	0,5
	Volumen	Superficie	2
Lineal	Superficie	Superficie	0
	Volumen	Superficie	1
Puntual soterrada	Volumen	Interior	1
Lineal soterrada	Volumen	Interior	0.5

Algunos investigadores han determinado valores del coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ ). Éstos se pueden visualizar en la Tabla 4 (Amick & Gendreau, 2000).

**Tabla 4.** Coeficiente de atenuación geométrica obtenidos por investigadores (Amick & Gendreau, 2000).

Investigador	Tipo de suelo	Coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ )
Wiss (1967)	Arenas	1
	Arcillas	1.5
Brenner & Chittikuladilok	Arenas en superficie	1.5
	Relleno de arena sobre arcilla blanda	0.8 - 1.0
Attewell & Farmer	Suelo firme	1
Nicholls, Johnson & Duvall	Suelo firme y roca	1.4 - 1.7
Martin	Arcillas	1.4
	Limo	0.8
Amick & Ungar	Arcillas	1.5

La atenuación del material ( $\alpha$ ) es debida a la disipación de energía en el interior del terreno por la fricción y cohesión entre las partículas del terreno. Este coeficiente estará afectado por el tipo de suelo y la frecuencia, como se puede observar en la expresión 2 (Sánchez, Cardona, Genescà, & Pàmies, 2005).

$$\alpha = \frac{\pi \cdot \eta \cdot f}{c} \quad (2)$$

donde  $\eta$  es un factor de pérdida,  $f$  es la frecuencia de la onda y  $c$  la velocidad de propagación de la onda (relacionada con la rigidez del suelo). El factor de pérdida está relacionado con el coeficiente de amortiguamiento.

Del mismo modo que el coeficiente de atenuación geométrica, varios investigadores han determinado valores del coeficiente de atenuación del material ( $\alpha$ ). Éstos se pueden visualizar en la Tabla 5 (Amick & Gendreau, 2000).

**Tabla 5.** Coeficiente de atenuación del material obtenidos por investigadores (Amick & Gendreau, 2000).

<b>Investigador</b>	<b>Tipo de suelo</b>	<b><math>\alpha</math> (m<sup>-1</sup>)</b>
Forssblad	Limo arenoso	0.13
Richart	4-6 pulgadas de concreto sobre suelo granular compactado	0.02
Woods	Arena limosa	0.26
Barkan	Arena fina saturada	0.1
	Arena fina saturada en estado congelado	0.06
	Arena saturada con limo orgánico y turba	0.04
	Arena arcillosa, arcilla con arena y limo sobre nivel freático	0.04
	Creta	0.1
	Loess	0.1
	Arcilla saturada con arena y limo	0.0-0.12
Dalmatov, et al.	Arena y limos	0.026-0.36
Clough and Chameau	Relleno de arena	0.05-0.2
	Duna de arena	0.026-0.065
Peng	Arcilla blanda de Bangkok	0.026-0.44

### **2.3. Estudio reciente. Ángel Sánchez; Joan Cardona y otros colaboradores**

En el 2005, Ángel Sánchez, Joan Cardona, Meritxell Genescà y Teresa Pàmies, realizaron un estudio experimental con el objetivo de utilizar la ecuación de Barkan en situaciones con diferentes características constructivas y del terreno de los lugares de medida. A partir de esto se pudo determinar cómo varían los valores de los parámetros alfa y gamma en cada caso.

Las medidas de vibración fueron llevadas a cabo en vías situadas en la zona norte-este de España. Se realizaron medidas de vibración con las tres configuraciones de vía más habituales en la zona: vía en superficie, vía en falso túnel y vía en túnel real (hecho con tuneladora). En todos los casos, las medidas de vibración se realizaron en la superficie. Las principales características del estudio fueron las siguientes:

- Las características geológicas predominantes en la vía en superficie correspondían a piedras calizas y cantos rodados con una matriz conformada por arena y arcilla. En el falso túnel se encontraban arenas, limos y gravas. En el túnel predominaban gravas, arena y arcilla.
- En superficie, las medidas del nivel de vibración se realizaron a una distancia de 10 m, 25 m, 50 m y 100 m de la vía. Éstas se tomaron en un tramo recto de vía donde la velocidad máxima de los trenes era de 220 km/h.
- En el túnel, las medidas de vibración se llevaron a cabo en una zona urbana. Éstas se hicieron a una distancia de 9 m, 15 m, 22 m y 43 m. Las medidas se tomaron de noche para evitar la contaminación de la señal debido a la presencia de otras fuentes.
- En el falso túnel, las medidas se tomaron en una zona urbana y a una distancia de la vía de 12 m, 28 m y 62 m.
- Para determinar el rango dentro del cual se encontraron los valores del coeficiente de atenuación material ( $\alpha$ ) y del coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ ) primero se determinó el rango de  $\alpha$  cuando  $\gamma$  es 0 y luego se determinó el rango de  $\gamma$  cuando  $\alpha$  es 0.

En la Tabla 6 se muestran los posibles valores de  $\gamma$  y  $\alpha$  obtenidos en ese estudio.

**Tabla 6.** Posibles valores de  $\gamma$  y  $\alpha$  que ajustan los datos experimentales a la expresión de Barkan

	Vía en superficie	Vía en túnel	Vía en falso túnel
$\alpha = 0$	$\gamma = 1,35 - 1,5$	$\gamma = 0,65 - 0,75$	$\gamma = 0,38 - 0,45$
$\gamma = 0$	$\alpha = 0,034 - 0,04 \text{ [m}^{-1}\text{]}$	$\alpha = 0,025 - 0,035 \text{ [m}^{-1}\text{]}$	$\alpha = 0,012 - 0,017 \text{ [m}^{-1}\text{]}$

Los autores concluyeron que la expresión teórica de Barkan se ajusta a los datos experimentales para los coeficientes de atenuación geométrica ( $\gamma$ ) y de amortiguación de material ( $\alpha$ ). Éstos afirman que, para cada situación, hay un rango de valores para la expresión de Barkan.

Los valores de  $\gamma$  llevan a considerar que el problema se puede modelar como una combinación de una fuente lineal y puntual de ondas Rayleigh. Por otro lado, los valores de  $\alpha$  son parecidos a los publicados por otros autores para terrenos de características similares.

La diferencia entre valores teóricos y experimentales, se debe a la diferencia entre fuente lineal finita e infinita. El modelo teórico considera una fuente lineal infinita, mientras que el paso de tren es una fuente lineal finita en movimiento.

## 2.4. Métodos de reducción de vibraciones

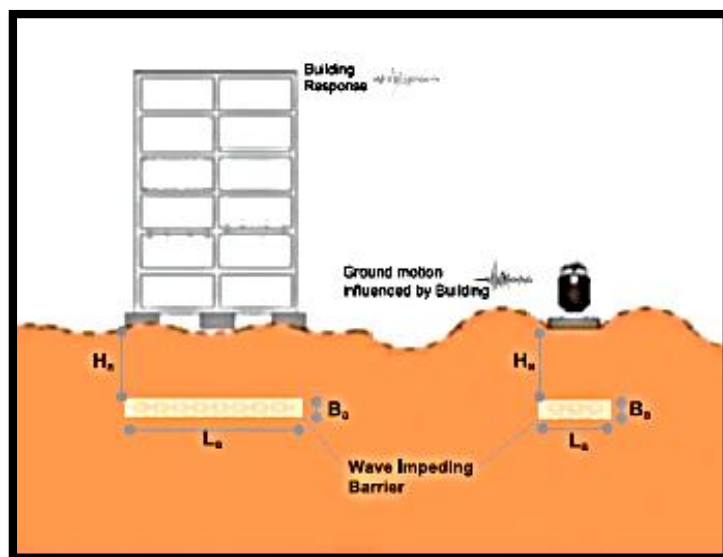
Las vibraciones inducidas por el paso de trenes en túneles pueden generar molestias en las personas y en edificios cercanos. Durante las últimas décadas se han realizado numerosas investigaciones con el objetivo de desarrollar una metodología eficiente y de bajo costo para reducir los efectos de estas vibraciones (Coulier et al., 2015).

Los métodos de aislamiento y reducción de vibraciones por el paso de trenes se pueden dividir en tres categorías:

- En la fuente de vibración.
- En un punto intermedio entre la fuente y el receptor.
- En el receptor.

Una de las ventajas de utilizar estos métodos en un punto intermedio entre la fuente y el receptor radica en que no se modifican los elementos que conforman las vías y por lo tanto se pueden proteger simultáneamente elementos aledaños a la vía contra las vibraciones (Coulier et al., 2015).

En la Figura 2 se puede observar los métodos de aislamiento en la fuente vibración y en el receptor.



**Figura 2.** Métodos de aislamiento de vibraciones en la fuente y en el receptor (Çelebi, & Göktepe, 2012).

### 2.4.1. En la fuente de vibración

La fuente de vibración corresponde al paso del tren. Ante esta acción habrá una interacción entre las ruedas, el riel y los elementos de la vía. Por lo tanto, las irregularidades y variaciones propias del tren y la vía generarán vibraciones en el entorno.

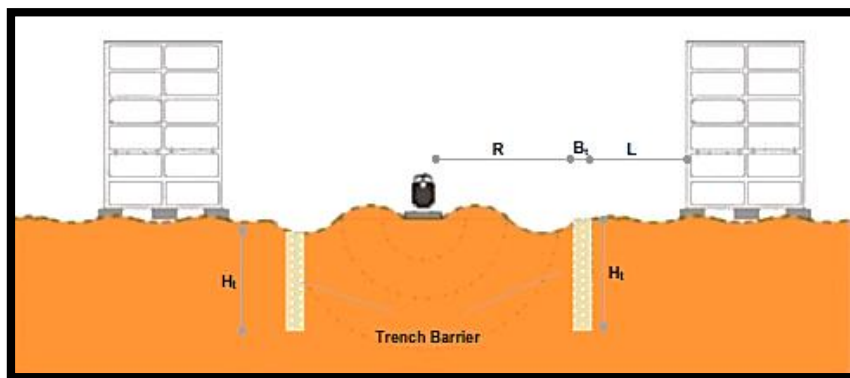
Es por eso que en la fuente existen soluciones para atenuar las vibraciones como es la mejora del terreno (compactándolo), el incremento del espesor de la capa de balasto, la variación de la velocidad del tren y la adaptación de elementos en la vía como son cojines amortiguadores bajo los rieles, en las traviesas o en balasto (Eitzenberger, 2008).

Por otro lado, el mantenimiento de los rieles y la vía, resulta de gran importancia para reducir el nivel de vibraciones generado por el tráfico ferroviario.

Çelebi & Göktepe (2012) afirman que el método de aislamiento más eficiente para reducir las vibraciones inducidas por el paso de trenes es establecer una barrera con las dimensiones adecuadas.

### 2.4.2. Entre la fuente y el receptor

Dentro de los elementos utilizados para reducir las vibraciones entre la fuente y el receptor se encuentran los muros de pantallas y zanjas (como se puede visualizar en la Figura 3). Estas zanjas pueden ser abiertas o rellenas de material como bentonita, concreto, agua, entre otros.



**Figura 3.** Esquema de zanja reductora de vibración (Çelebi, 2013).

El empleo de zanjas representa una solución económica y efectiva para atenuar las vibraciones. El uso de zanjas abiertas es más eficaz que el uso de zanjas con relleno, pero su aplicación práctica está limitada a bajas profundidades. Por otro lado, utilizando un material más blando de relleno aumenta la eficacia de la zanja (Adam & Von Estorff, 2005).

Con el uso de material de relleno blando se busca lograr un efecto similar al de una zanja abierta, al ser el relleno más blando que el suelo circundante. La ventaja de una zanja rellena es que permite alcanzar una mayor profundidad sin necesidad de soportes laterales permanentes en la vertical (Wanga & Martin, 2011).

Barkan (1962) plantea que la profundidad de la zanja debe ser de por lo menos un tercio de la longitud de onda. Por ejemplo, para una frecuencia de 20 Hz y una velocidad de onda de 150 m/s en arcilla, la longitud de onda sería 7.5 metros y por lo tanto la zanja debe ser de por lo menos 2.5 metros de profundidad.

### **2.4.3. En el receptor**

Una vez que las vibraciones se han propagado por el suelo, llegan a un receptor. Este receptor, por lo general son las cimentaciones de los edificios cercanos. Después de llegar a las cimentaciones, las vibraciones se propagan a las otras partes del edificio generando molestias en las personas y causando daños en los elementos estructurales (Eitzenberger, 2008).

Los métodos de reducción de las vibraciones en el receptor resultan complejos y tienen la desventaja de ser costosos y por lo tanto, pocas veces se recurre a métodos de reducción de vibraciones en el receptor. Normalmente se aplica un aislamiento en la cimentación del edificio. La ubicación de éste juega un papel importante en la mitigación vibraciones estructurales (Wanga & Martin, 2011).

El uso de una losa de fundación puede reducir considerablemente las vibraciones en la estructura, pero representa un costo mayor (M. Adam, O. von Estorff, 2005).

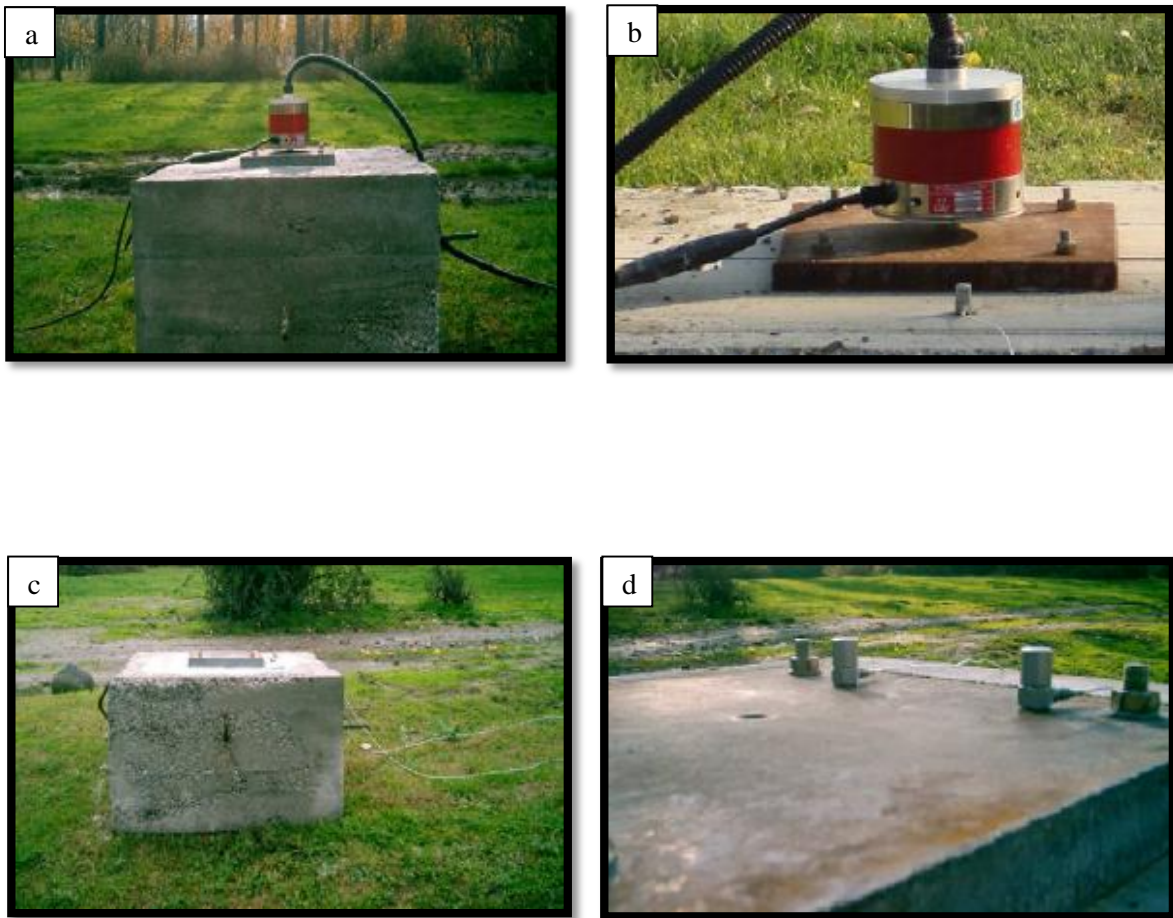
### **2.4.4. Estudio reciente. Erkan Çelebi, y otros colaboradores**

Erkan Çelebi y sus colaboradores presentaron el artículo “Experimentos de campo sobre propagación de ondas y el aislamiento de vibraciones utilizando barreras”. Este artículo fue presentado en la revista “Soil Dynamics and Earthquake Engineering” en 2009.

El propósito del estudio fue describir las características de la propagación de ondas y conocer las medidas para reducir el impacto de las vibraciones en estructuras cercanas. Se realizaron pruebas de campo y se conoció la eficiencia del uso de barreras aisladoras de vibraciones con relleno y sin relleno.

En este estudio experimental, se utilizó un agitador electrodinámico que induce una carga armónica con una determinada frecuencia. Además, se utilizaron acelerómetros para obtener los valores generados. En la Figura 4 se pueden observar el agitador y el acelerómetro utilizado.



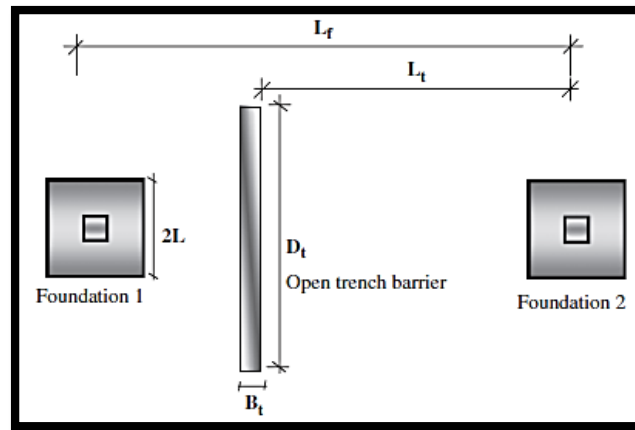


**Figura 4.** Agitador electrodinámico (a, b) y acelerómetros colocados (c, d)

El ensayo y la zona de estudio tenían las siguientes características:

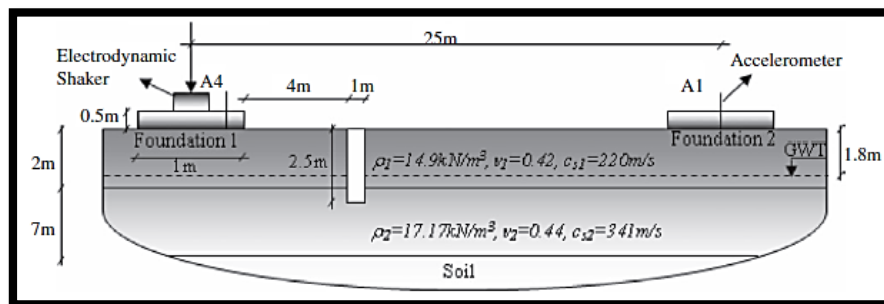
- Se construyeron dos zapatas separadas a 25 metros. La primera zapata se utilizó para inducir la carga armónica y la otra para el registro de las ondas producidas al aplicar la carga armónica.
- El suelo de la zona se caracterizaba por ser arcilla, limos arcillosos y gravas. Los tres primeros metros se caracterizaban por ser una arcilla de baja plasticidad. Los próximos dos metros correspondían a una grava limosa.
- La profundidad de las zanjas fueron de 2.5 metros, 1 metro de ancho y 3 metros de largo. En la Figura 5 se muestra un esquema de las zapatas y la zanja.



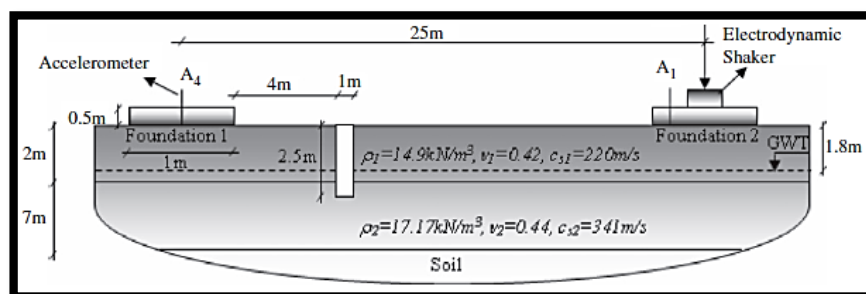


**Figura 5.** Esquema de las zapatas y la zanja construida.

- El experimento se realizó sin zanja, con zanja abierta, con zanja de agua, con zanja de bentonita, con zanja de concreto. Las frecuencias utilizadas fueron de 10 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz y 100 Hz.
- Se realizaron dos tipos de ensayos: tomando en cuenta un aislamiento activo (donde la carga está cerca de la zanja) y un aislamiento pasivo (donde la carga está alejada de la zanja). En la Figura 6 y la Figura 7 se muestra un esquema donde se visualiza el ensayo activo y pasivo respectivamente.



**Figura 6.** Ensayo considerando aislamiento activo



**Figura 7.** Ensayo considerando aislamiento pasivo.

A partir del ensayo, en cuanto al emisor y considerando un aislamiento activo, se pudo comprobar que la distancia de la fuente hasta la zanja influye en la propagación de la onda. Además, los desplazamientos verticales tienen un comportamiento similar hasta una frecuencia de 50 Hz.

En cuanto al receptor y considerando un aislamiento activo, para 10 Hz y 25 Hz, la zanja con agua, experimenta una atenuación de más de un 75% en comparación con la de concreto. La zanja con bentonita influye en una mayor atenuación para frecuencias superiores a 50 Hz.

Luego se realizó un ensayo considerando un aislamiento pasivo y se pudo visualizar en cuanto al emisor, que las zanjas con agua tienen mayor efecto de atenuación entre 10 Hz y 50 Hz. Para frecuencias superiores a 75 Hz, las ondas tienden a moverse a la superficie.

En cuanto al receptor, se pudo visualizar que el comportamiento de las vibraciones es similar en todos los casos y casi no se atenúan. La zanja con bentonita brinda una mayor atenuación para una frecuencia de 10 Hz mientras que la zanja con agua da mayor atenuación que las otras para 25 Hz.

En general, los resultados llevaron a concluir que se pueden utilizar trincheras abiertas o rellenas para reducir las vibraciones, siempre y cuando se tome en cuenta el valor de la frecuencia. Se pudo verificar que una zanja abierta es más efectiva para el aislamiento de las vibraciones, pero su aplicación está limitada a bajas profundidades. Por otro lado se pudo comprobar que usando un material de relleno blando aumenta la atenuación de las vibraciones y es aplicable para trincheras más profundas.

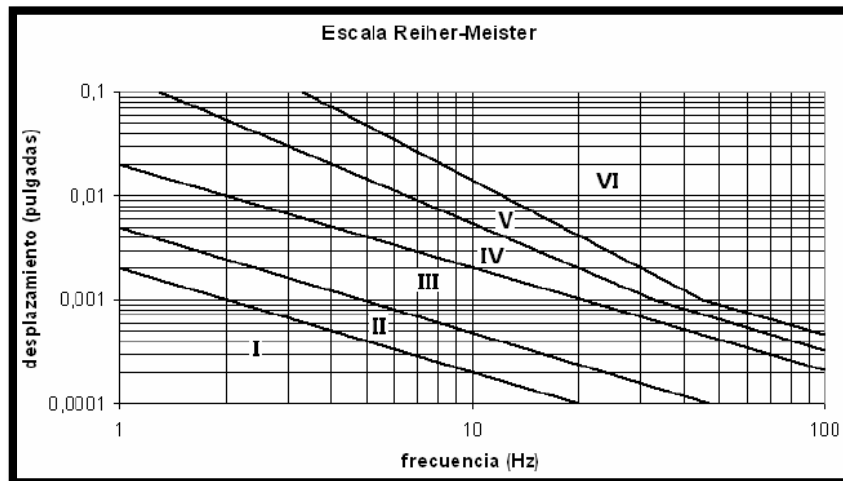
## **2.5. Umbral de vibraciones y algunas normativas**

### **2.5.1. Umbral de vibraciones**

Las vibraciones inducidas por el paso de trenes en general tienen un rango de frecuencia de 4-50 Hz, dependiendo de la velocidad de éstos. Estas vibraciones se propagan por el suelo y llegan a las estructuras cercanas a través de los cimientos en donde pueden amortiguarse o amplificarse. Éstas pueden generar molestias en las personas y en algunos casos pueden generar desplazamientos que afectan elementos propios de la vía (Celebi & Goktepe, 2012).

Cabe destacar que las magnitudes de estas vibraciones (frecuencias, aceleraciones, velocidades, desplazamientos, entre otros) deben ser evaluadas para conocer si son tolerables o no. Es por eso que existen normas para valorar el grado de afectación a las estructuras y las personas. Los criterios que se siguen para aceptar los valores tolerables están basados en criterios estructurales, psicológicos y productivos (Fernández Ruiz, 2014)

Reiher y Meister, a principios de los años treinta, desarrollaron una escala para evaluar la respuesta del cuerpo humano frente a vibraciones estacionarias del edificio. Esta escala cuenta con seis etapas que van desde no perceptible a muy molesta, como se puede visualizar en la Figura 8 (Wanga & Martin, 2011).



**Figura 8.** Umbrales de percepción de una persona de pie sujeta a vibración vertical (Reiher y Meister) donde I: No perceptible, II: ligeramente perceptible, III: claramente perceptible, IV: fuertemente perceptible, V: molesta, VI: muy molesta (Wanga & Martin, 2011).

Pretlove y Rainer, en 1995, establecieron una relación entre el umbral de percepción de una persona estando de pie con la aceleración y la velocidad. Para valores de frecuencia entre 1 y 10 Hz se considera determinante el valor máximo de la aceleración, mientras que para valores entre 10 y 100 Hz se considera determinante la velocidad vertical. Esto se puede visualizar en la Tabla 7 (Wanga & Martin, 2011):

**Tabla 7.** Umbrales de percepción de una persona de pie para vibraciones armónicas (Wanga & Martin, 2011)

Descripción	Aceleración punta( $\text{mm/s}^2$ )	Velocidad (mm/s)
Apenas perceptible	34	0.5
Claramente perceptibles	100	1.3
Desagradable / Molesto	550	6.8
Intolerable	1800	13.8

### 2.5.2. Normativas

Existen normativas que valoran el grado de afectación de las vibraciones en el cuerpo humano, en edificios y maquinarias. Es importante saber que los indicadores empleados tradicionalmente para la evaluación de las vibraciones provienen de la Norma ISO 2631-2 (1989) y la ISO 2631-1 (1997). Esta norma ha sido sustituida por la Norma ISO 2631-2 (2003). Existen otras normas como son la DIN 4150-2 (1999), ISO 14837-1 (2005), entre otras. En la Tabla 8 se presenta una breve descripción de estas normas (Matos Moquete, 2015)

**Tabla 8.** Normas que regulan el nivel de vibraciones

<b>Norma</b>	<b>Descripción</b>
ISO 2631-2 (1989)	Relaciona las aceleraciones (RMS o m/s <sup>2</sup> ) o velocidades (RMS o m/s) admisibles con la frecuencia de 1/3 de octava de banda (Hz) mediante curvas, que están enumeradas del 1 – 128, en función de la situación considerada (permanente, diurno o nocturno, etc.).
ISO 2631-1 (1997)	Cuantifica los niveles de vibraciones del cuerpo entero en relación del confort y salud humana, probabilidad de vibración e incidencia de mareo. El rango de frecuencia que considera está entre 0.1 y 80 Hz.
DIN 4150-2(1999)	Valora los efectos de las vibraciones en personas que se encuentran en el interior de edificios.
ISO 2631-2 (2003)	Incluye las funciones de pesos en función de decibelios (dB) y las mismas consideraciones que la del 1989.
ISO 14837-1 (2005)	Analiza las vibraciones y ruidos que se generan en un sistema ferroviario, tomando en cuenta tres aspectos fundamentales como las características de la fuente, la propagación y la respuesta de la estructura. Excluye el impacto ambiental que generan las vibraciones y el ruido.

## Capítulo 3: Análisis numérico: Programas PLAXIS

### 3.1. Introducción

Existen varios programas que permiten resolver problemas dinámicos como por ejemplo FLAC, QUAD4-M, SASSI y ALGOR (Galván Adames, 2014). Otro de los programas que permiten resolver este tipo de problemas es el Plaxis 2D, el cual se utilizará para resolver el caso de estudio.

Plaxis 2D es un programa de elementos finitos desarrollado para el análisis de deformaciones y estabilidad en ingeniería geotécnica considerando dos dimensiones. El desarrollo de este programa inició en 1987 en la Universidad Tecnológica de Delft. El objetivo principal fue desarrollar un código basado en elementos finitos y de fácil uso para analizar diques sobre suelos blandos en Holanda (Plaxis, 2017).

Este programa posee una interfaz gráfica que permite dibujar de forma sencilla cualquier geometría que represente el problema geotécnico. En éste se pueden incluir terraplenes, cimentaciones, pilotes, túneles, pantallas, entre otros, en donde se asignan sus propiedades y finalmente se discretiza para realizar el cálculo.

Cabe destacar que para llevar a cabo una simulación de elementos finitos en Plaxis, el medio continuo es dividido en un número definido de elementos triangulares. Este consiste de un número de nodos y de puntos de tensión. Los elementos principales son los triangulares de 6 nodos y los de 15 nodos.

Plaxis realiza análisis plásticos, de consolidación y de seguridad. Además posee un módulo dinámico que permite resolver la ecuación de equilibrio y puede ser utilizado para analizar las vibraciones en el terreno y su influencia en las estructuras. En este módulo se puede tomar en cuenta la amortiguación del material.

Para el proceso de cálculo de un problema dinámico en PLAXIS se utilizan cuatro subprogramas:

- Entrada de datos
- Fase de cálculo
- Salida de los resultados
- Curvas

En la entrada de datos se crea la geometría, se asignan las propiedades, se define el modelo constitutivo, se establecen las condiciones de contorno y se realiza el mallado. En el programa de cálculo se introduce la carga dinámica, la cual puede introducirse manualmente o a partir de un archivo ASCII. En la salida de resultados y curvas se puede observar el comportamiento a partir de gráficos en donde se puede observar los esfuerzos, presiones de poros, desplazamientos, aceleraciones, velocidades, entre otros. Estos resultados se pueden exportar a Excel.

### 3.2. Modelos constitutivos

La elección de modelos constitutivos del suelo en problemas de ingeniería es un aspecto importante del proceso de modelado. Esto se debe a que para simular el comportamiento de un material es necesario tener modelos que relacionen esfuerzos y deformaciones con las propiedades de éste. Por lo tanto, se recurre a leyes matemáticas que permitan representar el comportamiento de estos materiales. Estas leyes reciben el nombre de modelos constitutivos (Laera, 2015).

Cabe destacar que un modelo constitutivo de suelo, incluso el más complejo, es una simplificación del comportamiento real del suelo. Éste debe elegirse de acuerdo con las características del problema y limitaciones en el comportamiento general.

Por un lado, los modelos constitutivos de suelo con un número reducido de parámetros son bastante fáciles de calibrar, pero se hacen más suposiciones sobre el comportamiento del suelo y no pueden ser controladas por el usuario. Por otro lado, los modelos constitutivos complejos brindan la posibilidad de modelar más características del comportamiento, pero requieren un conocimiento adecuado de los parámetros del modelo y una extensa caracterización del suelo para realizar una calibración adecuada (Laera, 2015).

Plaxis está conformado por trece modelos constitutivos (como se puede visualizar en la Figura 9) que permiten simular el comportamiento del suelo. Para el análisis dinámico de este trabajo se utilizó el modelo lineal elástico, debido a que los problemas de este tipo están limitados a muy pequeñas deformaciones, en un rango donde dicho modelo se considera razonable.

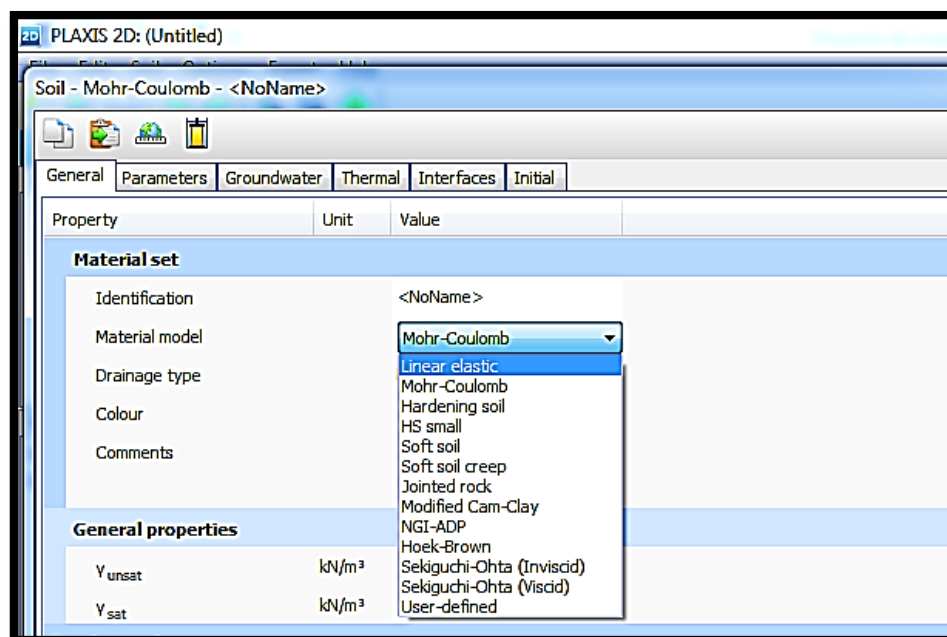


Figura 9. Modelos constitutivos de Plaxis

## Modelo lineal elástico

El modelo lineal elástico es el modelo que asume una relación lineal entre la tensión-deformación dada por la ley de Hooke de la elasticidad isotrópica. Éste toma en cuenta dos parámetros principales (Plaxis, 2017):

E: Módulo de Young (kN/m<sup>2</sup>)

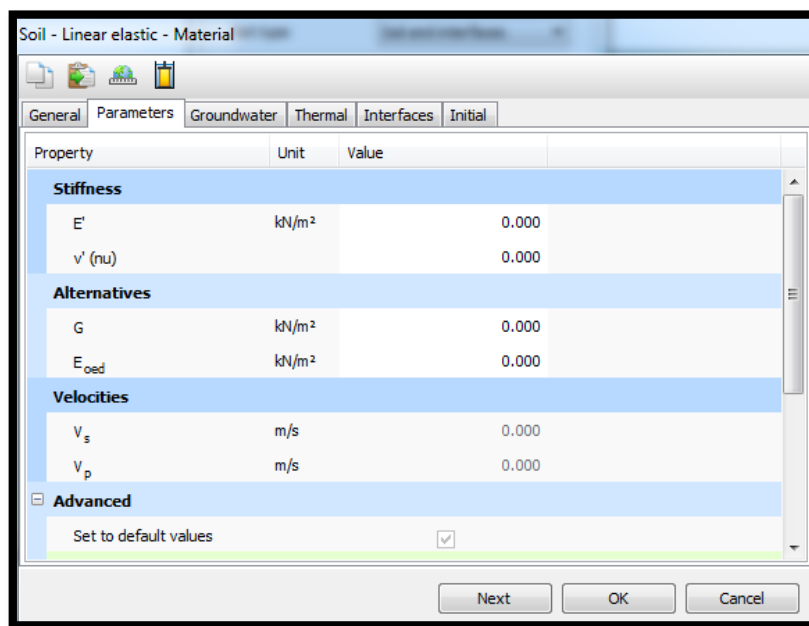
v: Coeficiente de Poisson

Se presentan también valores del módulo de corte (G) y el módulo edométrico (E<sub>oed</sub>). Éstos se expresan en kN/m<sup>2</sup> y son presentados como valores auxiliares. Se calculan según la expresión 3 y 4 (Plaxis, 2017). En la Figura 10 se muestra la ventana de Plaxis donde se introducen los parámetros antes mencionados.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

$$E_{oed} = \frac{E(1-\nu)}{(1-\nu)(1-2\nu)} \quad (4)$$

Este modelo se utiliza debido a que las deformaciones debidas a vibraciones entran casi siempre en el rango elástico lineal.



**Figura 10.** Parámetros del modelo elástico lineal.

### 3.3. Módulo dinámico

Plaxis posee un módulo dinámico que permite resolver la ecuación de equilibrio bajo la influencia de una carga dinámica. Esta ecuación se representa en la expresión 5.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (5)$$

Donde:

$M$  : representa la matriz de masa (ésta toma en cuenta la masa del agua y de las partículas sólidas del suelo).

$\ddot{u}$ ,  $\dot{u}$  y  $u$ : representa los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento respectivamente.

$K$ : la matriz de rigidez y  $F$  el vector de la carga.

El termino  $Ku = F$  corresponde al cálculo de la deformación estática (Plaxis, 2017).

La matriz  $C$  representa la amortiguación del material. Esta amortiguación de los materiales es causada por la fricción o por deformaciones irreversibles. Este parámetro es difícil de determinar y por lo tanto, en las formulaciones de elementos finitos,  $C$  es representada por el amortiguamiento de Rayleigh, el cual se representa como una función de las matrices de masa y rigidez como se puede visualizar en la expresión 6 (Plaxis, 2017).

$$C = \alpha_R M + \beta_R K \quad (6)$$

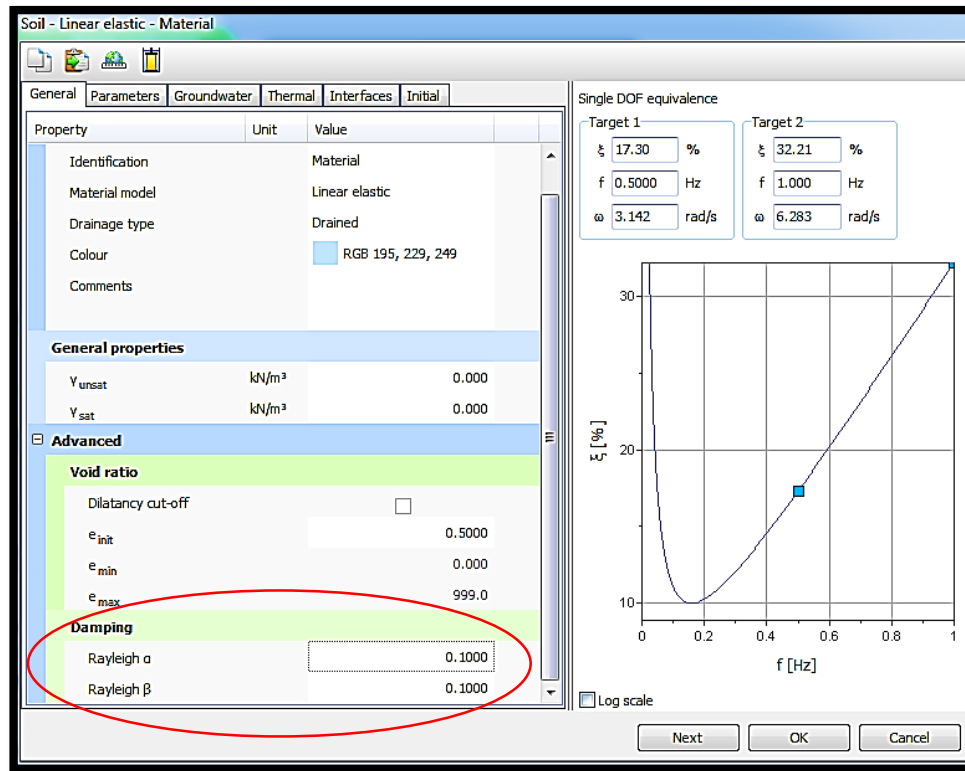
Donde:

$\alpha_R$  y  $\beta_R$ : representan los coeficientes de Rayleigh.

### 3.4. Coeficientes de Rayleigh

Los coeficientes  $\alpha_R$ ,  $\beta_R$  inciden en el amortiguamiento del material.  $\alpha_R$  influye en la matriz de masa mientras que  $\beta_R$  influye en la matriz de rigidez. En Plaxis, estos parámetros se introducen en la ventana “General” de la opción “Material sets”, como se muestra en la Figura 11 y pueden ser asignados a suelos y placas. Al hacer clic, la ventana se expande y es posible calcular los coeficientes de Rayleigh a partir de la razón de amortiguamiento y las frecuencias.





**Figura 11.** Introducción de los coeficientes de Rayleigh.

Los coeficientes de Rayleigh  $\alpha_R$  y  $\beta_R$  dependen de la razón de amortiguamiento ( $\xi$ ). La relación de estos parámetros con la razón de amortiguamiento obtenida con una columna de suelo es la mostrada en la expresión 7 y 8 (Plaxis, 2017):

$$\alpha + \beta \omega^2 = 2\omega\xi \quad (7)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (8)$$

donde  $\omega$  es la frecuencia angular en rad/s y  $\xi$  es la razón de amortiguamiento.  $f$  es la frecuencia en Hz (1/s).

Los valores altos de  $\alpha$  amortiguan bajas frecuencias y un alto valor de  $\beta$  amortigua altas frecuencias (Plaxis, 2017). Por otro lado cuando  $\xi > 1$  está sobre amortiguado, cuando  $\xi = 1$  es amortiguación crítica y  $\xi < 1$  es sub-amortiguado (Plaxis, 2017).

Resolviendo la expresión 7 y 8 para dos frecuencias diferentes se obtienen las expresiones 9 y 10.

$$\alpha = 2\omega_1\omega_2 \frac{\omega_1\xi_2 - \omega_2\xi_1}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad (9)$$

$$\beta = 2 \frac{\omega_1\xi_1 - \omega_2\xi_2}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad (10)$$

La formulación de la amortiguación viscosa de Rayleigh es una solución aproximada, por tanto hay que tener cuidado con la selección de la frecuencias para obtener la respuesta dinámica deseada (Wanga & Martin, 2011)

### 3.5. Integración temporal y pasos de tiempo

La integración temporal constituye una parte importante en la precisión del proceso de cálculo. En ésta generalmente se utilizan los métodos de integración explícita o implícita. La integración explícita es fácil de formular pero impone limitaciones en el paso del tiempo mientras que la integración implícita es más complicada pero proporciona resultados más precisos (Plaxis, 2017).

Los parámetros alfa y beta de Newmark (los cuales son diferentes a los de Rayleigh) determinan la integración temporal de acuerdo con el esquema implícito de Newmark y son utilizados para obtener resultados estables. En este método, el desplazamiento y la velocidad en un punto para un tiempo  $t + \Delta t$  se expresa siguiendo expresión 11 y 12:

$$u^{t+\Delta t} = \dot{u}^t + \dot{u}^t \Delta t + \left( \left( \frac{1}{2} - \alpha \right) \ddot{u}^t + \alpha \ddot{u}^{t+\Delta t} \right) * \Delta t^2 \quad (11)$$

$$u^{t+\Delta t} = \dot{u}^t + \left( (1 - \beta) \dot{u}^t + \beta \dot{u}^{t+\Delta t} \right) \Delta t \quad (12)$$

Éstos deben cumplir con las siguientes condiciones que se presentan en la expresión 13 (Plaxis, 2017).

$$\beta \geq 0.5 \quad y \quad \alpha \geq 0.25 * (0.5 + \beta)^2 \quad (13)$$

En un esquema amortiguado de Newmark (Plaxis, 2017)

$$\beta = 0.6 \text{ y } \alpha = 0.3025 \quad (14)$$

Para un esquema de aceleración promedio (Plaxis, 2017)


$$\beta = 0.5 \text{ y } \alpha = 0.25 \quad (15)$$

El paso del tiempo que utiliza Plaxis es constante y se calcula mediante la expresión 16.

$$\delta t = \frac{\Delta t}{n * m} \quad (16)$$

donde:  $\Delta t$  es el tiempo de duración de la carga dinámica,  $n$  es el número de pasos adicionales y  $m$  es el número de sub pasos adicionales.

### 3.6. Cargas dinámicas

En Plaxis, para realizar un cálculo dinámico se deben tomar en cuenta dos fases: una fase estática (en donde se consideren cálculos plásticos) y una fase dinámica. Éste es representado por el icono  en la fase de cálculo.

Cabe destacar que la carga dinámica aplicada es el resultado del valor de la carga, la amplitud y el tiempo de aplicación de la carga. Esta carga (ya sea puntual o distribuida) puede introducirse como una carga armónica o mediante un archivo ASCII o SMC en la opción Dynamic Multipliers del Model explorer (Plaxis, 2017).

#### Cargas Armónicas

En Plaxis, las cargas armónicas se definen mediante la expresión 17 (Plaxis, 2017):

$$F = M * f * \sin(\omega t + \emptyset_0) \quad (17)$$

donde:

$M$ : amplitud del multiplicador

$f$  = El valor de la carga en el input.

$\omega = 2\pi f$ ,  $f$  es la frecuencia en ciclos por unidad del tiempo dinámico (s)

$\emptyset_0$ : Angulo inicial

## **Carga introducida un archivo ASCII o SMC**

Otra manera de introducir la carga es mediante un archivo ASCII o SMC. El archivo ASCII estará conformado por una tabla de dos columnas, una donde se puede visualizar el tiempo y otra donde se visualiza el multiplicador que conformará esta carga (Plaxis, 2017)

El archivo SMC (Strong Motion CD-ROM), es utilizado mayormente por el Servicio Geológico de Estados Unidos para registrar terremotos y otras vibraciones fuertes. La mayoría de estos archivos contienen aceleraciones, velocidades, desplazamientos y el espectro de respuesta.

### **3.7. Condiciones de contorno**

En un problema dinámico es de gran importancia tener en cuenta las condiciones de contorno con absorción de energía debido a que las vibraciones tienden a generar reflexiones que conllevan a una distorsión en los resultados. Es por eso que existen los contornos absorbentes.

Los coeficientes de relajación  $C_1$  y  $C_2$  son utilizados para absorber las ondas en los contornos.  $C_1$  corrige la disipación en la dirección normal del contorno mientras que  $C_2$  corrige en la dirección tangencial.  $C_1$  y  $C_2$  serán igual a 1 en el caso de que los contornos estén sujetos a ondas en la dirección perpendicular (dirección normal). En caso de que sea en dirección tangencial,  $C_2$  debe ser ajustado. El uso de  $C_1 = 1$  y  $C_2 = 0.25$ , según la experiencia, da como resultado una absorción razonable de las ondas en el contorno. (Plaxis, 2017).

El uso de los contornos viscosos se basa en el método descrito por Lysmer y Kuhlmeyer (1969). Estos límites viscosos permiten absorber la energía aplicada en la dirección normal y tangencial. Esta opción se usa cuando la fuente dinámica se encuentra dentro de la malla. Por lo tanto, los coeficientes de relajación  $C_1$  y  $C_2$  se deben considerar.

## Capítulo 4: Presentación de los modelos y análisis de resultados

### 4.1. Introducción

En el presente capítulo, se plantean varios modelos para resolver los casos de estudio utilizando Plaxis. Inicialmente se procederá a estudiar la ecuación de Barkan en una geometría sencilla de suelo y con diferentes módulos de rigidez en donde se aplicará una carga en superficie de 1 kN/m y 5 Hz de frecuencia. También se realizará otro modelo en donde se aplicará este mismo proceso en un túnel (tomando en cuenta una sola rigidez) a diferentes profundidades y donde se simula el paso de un tren a partir de la misma carga armónica. Finalmente se realizará un tercer modelo donde se estudiará el efecto de los métodos de reducción de vibraciones a partir de zanjas con diferentes materiales de relleno y variando las profundidades. Éstas se modelarán para una condición de carga en superficie y una en profundidad.

Para estudiar la ecuación de Barkan y conocer el comportamiento del coeficiente de atenuación geométrica y el coeficiente de atenuación del material, se procederá a variar los coeficientes de Rayleigh ( $\alpha$  y  $\beta$ ). Esto se aplicará tanto en superficie como en el túnel y se estudiarán las tendencias de estos coeficientes.

También, en este capítulo se describen los resultados obtenidos a partir de los modelos planteados. Este análisis estará basado en la obtención de velocidades y aceleraciones a partir de los puntos evaluados.

Para analizar la ecuación de Barkan en el modelo 1(modelo con carga en superficie) y el modelo 2 (modelo del túnel), se procederá a conocer las amplitudes verticales máximas de las velocidades en los puntos evaluados. Cabe destacar que se realizaron modelos con diferentes rigideces y combinaciones de coeficientes de Rayleigh. A partir de los resultados, se conocerá la relación que existe entre los parámetros de amortiguamiento de Plaxis y la rigidez con los coeficientes de atenuación geométrica y el coeficiente de atenuación del material de la expresión de Barkan.

Por otro lado, para analizar el modelo 3 (método de reducción de vibraciones), se procederá a conocer la aceleración máxima de un punto en superficie para así estudiar la eficiencia de las zanjas. Estas zanjas se modelaron a diferentes profundidades y con diferentes materiales de relleno. Esto mismo se aplicará para una carga en profundidad.

A partir de los resultados del modelo 3 (los cuales se expresan en aceleraciones máximas) se podrán hacer relaciones con las normativas actuales que tratan sobre el control de vibraciones.

## 4.2. Primer modelo: carga en superficie

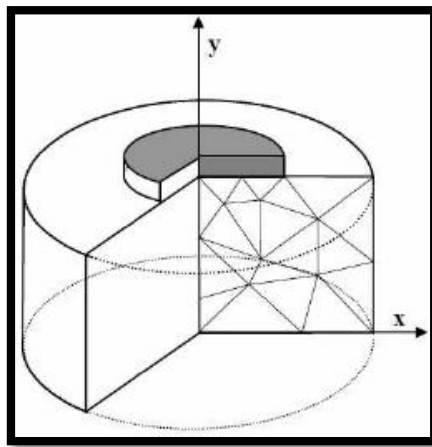
### 4.2.1. Consideraciones generales

Para realizar el análisis se definen las propiedades del modelo, tomando en cuenta el tipo de modelo, sus elementos y las unidades de medida.

Para este caso se considera una geometría axisimétrica. Éste permite suponer estado de tensión idénticos en cualquier dirección radial (ver Figura 12) y es recomendado para problemas sencillos que involucren vibraciones.

Por otro lado se establecerán elementos triangulares de 15 nodos. Con esto se buscará realizar interpolaciones de cuarto orden para los desplazamientos además de involucrar doce puntos de Gauss para los esfuerzos.

Además se establecen las unidades de medida. La longitud se expresará en metros (m), la fuerza en kilonewtons (kN) y el tiempo en segundos(s). No se toma en cuenta la presencia de agua.



**Figura 12.** Modelo axisimétrico (Plaxis, 2017).

En el modelo se toma en cuenta el efecto del amortiguamiento y por lo tanto se asignan valores a los coeficientes de Rayleigh (ver apartado 4.2.3).

En cuanto a las condiciones de contornos, se asumieron los contornos viscosos para evitar alteraciones debido a las reflexiones de las ondas. Se consideró un valor de  $C_1 = 1$  y  $C_2 = 0.25$ .

### 4.2.2. Geometría del modelo

El modelo a estudiar corresponde a un suelo que tiene las siguientes coordenadas (m):

- Esquina inferior izquierda: (0, 0)
- Esquina inferior derecha: (100, 0)
- Esquina superior derecha: (100, 60)
- Esquina superior izquierda: (0, 60)

Luego de tener esta geometría, se aplicó una carga de 1 kN/m y 5 Hz en la coordenada (0,60), resultando la geometría que se visualiza en la Figura 13.



**Figura 13.** Geometría del modelo

Después de definir la geometría y colocar la carga se asignan las propiedades de los materiales.

### 4.2.3. Propiedades de los materiales

Las propiedades del suelo se presentan en la Tabla 9. Se supone un modelo elástico lineal y se toman en cuenta varias rigideces, que van desde poco rígido a muy rígido. Los coeficientes de Rayleigh tomados son valores típicos del manual de Plaxis.

Cabe destacar que para lograr analizar la ecuación de Barkan, los coeficientes de Rayleigh fueron variados (de 0.001 a 0.05) y combinados, resultando 34 modelos a estudiar. Luego, los valores de los coeficientes de Rayleigh se invierten y se procede a analizar 34 modelos más (ver Anexo A).

Después de asignar las propiedades a los materiales y establecer las condiciones de contorno se procedió a realizar el mallado de elementos finitos.

#### Propiedades del suelo

**Tabla 9.** Propiedades del suelo

<u>Parámetro</u>	<u>Unidades</u>	<u>Variante 1</u>	<u>Variante 2</u>	<u>Variante 3</u>
<b>Material model</b>		Lineal elástico	Lineal elástico	Lineal elástico
<b>Drainage type</b>		Drenado	Drenado	Drenado
<b>Peso específico <math>\gamma</math></b>	kN/m <sup>3</sup>	20	20	20
<b>Módulo de Young E</b>	MPa	100	1000	10000
<b>Coeficiente de Poisson <math>\nu</math></b>	-	0.3	0.3	0.3
<b>Coeficientes de Rayleigh</b>		$\alpha=0.001-0.05$	$\alpha=0.001-0.05$	$\alpha=0.001-0.05$
		$\beta=0.001-0.05$	$\beta=0.001-0.05$	$\beta=0.001-0.05$
		Ver anexo A	Ver anexo A	Ver anexo A



#### 4.2.4. Fases de cálculo

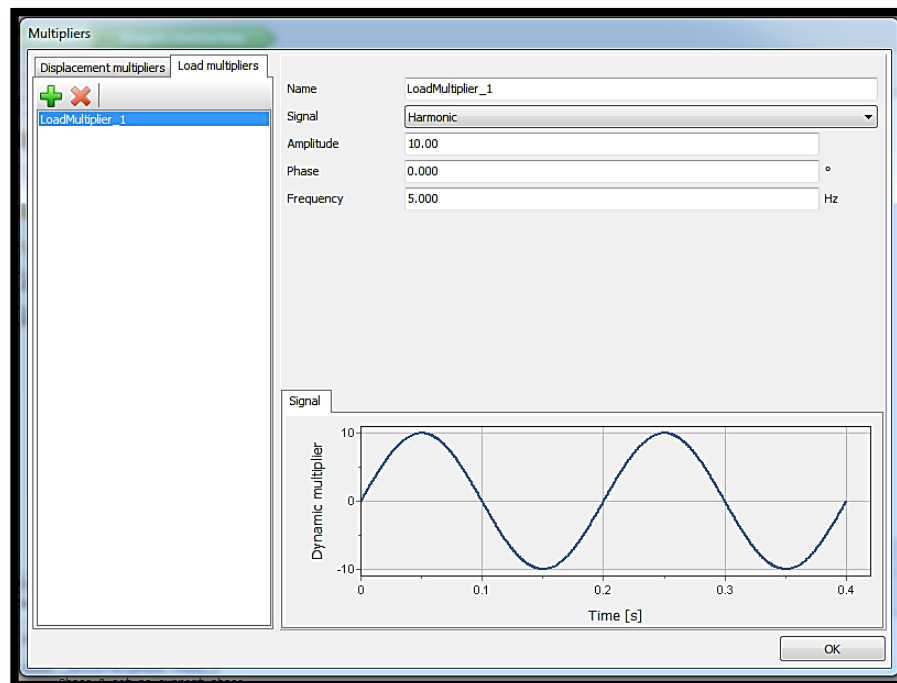
Para conocer el efecto de la carga armónica aplicada, el cálculo se divide en tres fases. La fase inicial y las últimas dos fases que son dinámicas.

##### Fase inicial

En esta fase se verifica que todos los elementos se encuentren desactivados.

##### Fase 1: Aplicación de la carga armónica

En esta fase de análisis dinámico se aplica una carga armónica de 5 Hz. Esta carga se aplica por un tiempo de 1.5 segundos y considerando 1000 pasos de tiempo. En la Figura 14 se muestra la carga impuesta en la opción Dynamic Multipliers del Model Explorer.



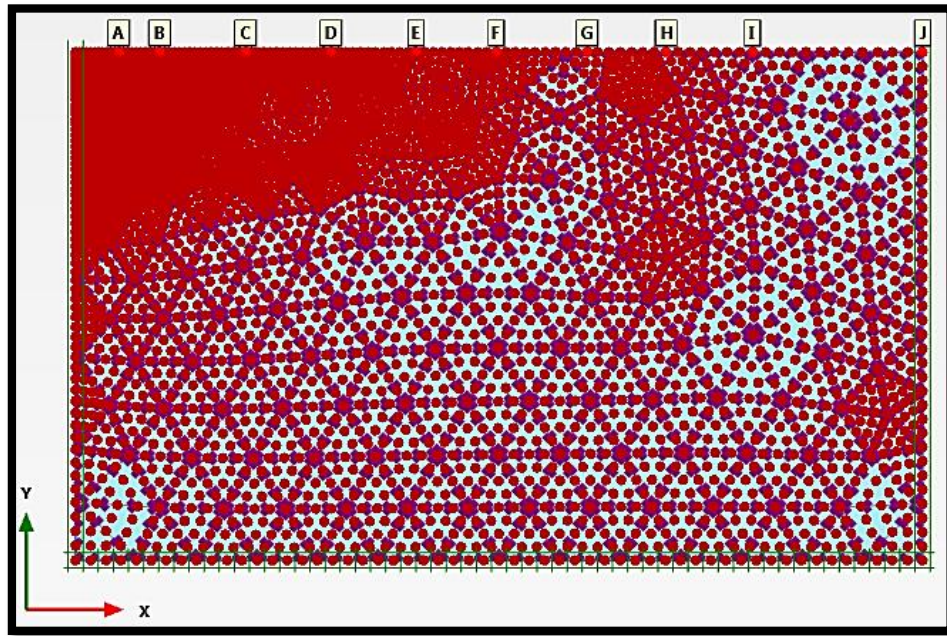
**Figura 14.** Carga armónica aplicada.

##### Fase 2: Desactivación de la carga armónica

Igual que en la fase 1, se considera un cálculo dinámico. La carga armónica se desactiva por un tiempo de 2.5 segundos y se consideran 1000 pasos de tiempo por igual.

Antes de proceder a realizar el cálculo, se eligen los puntos de interés. Éstos se encontrarán ubicados a cierta distancia de la aplicación de la carga. Los puntos se seleccionan en las siguientes coordenadas: A (5.11, 60), B (9.90, 60), C (20.05, 60), D (30.14, 60), E (40.19, 60), F (49.67, 60), G (60.40, 60), H (69.70, 60), I (79.93, 60), J (100,60) como se puede apreciar en la Figura 15.

Con el estudio de estos puntos se buscará conocer las amplitudes máximas de las velocidades y así resolver la ecuación de Barkan, conociendo el comportamiento del coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ ) y del coeficiente de atenuación del material ( $\alpha$ ).



**Figura 15.** Puntos a evaluar en el modelo 1.

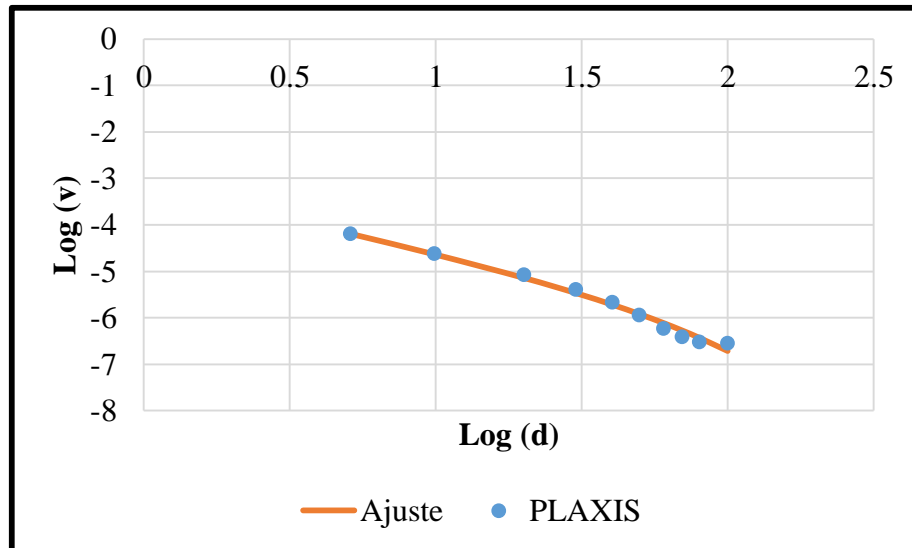
#### 4.2.5. Resultados

Después de conocer la distancia de los puntos desde la fuente (ver Tabla 10), se tomaron las amplitudes máximas y se realizó una gráfica Log (Velocidad) vs Log (Distancia). Mediante un ajuste por mínimos cuadrados se determinó el valor del coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ ) y el coeficiente de atenuación del material ( $\alpha$ ) del método de Barkan.

**Tabla 10.** Distancia desde la fuente de los puntos evaluados.

Punto	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Distancia desde la fuente(metros)	5.11	9.9	20.05	30.14	40.19	49.67	60.4	69.7	79.93	100

En la Figura 16 se presenta un ejemplo de un ajuste realizado. Este corresponde a una rigidez de 1000 MPa y coeficientes de Rayleigh  $\alpha$  y  $\beta$  igual a 0.01. A partir del ajuste mostrado se pudo determinar que  $\gamma$  fue igual a 1.455 y  $\alpha$  igual a 0.017.



**Figura 16.** Gráfica Log (v) vs Log (d). 1000 MPa.  $\alpha$  y  $\beta$  0.01.

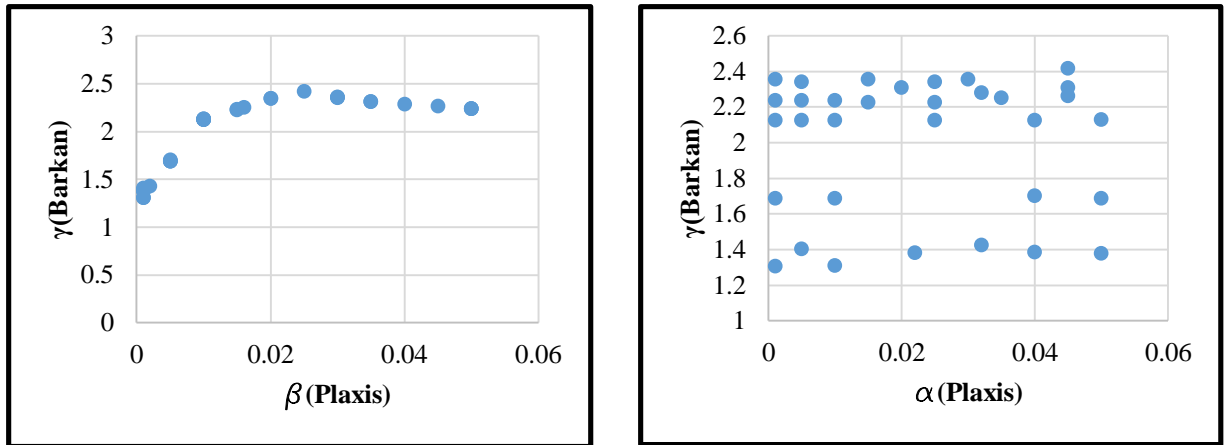
Para cada modelo se hicieron ajustes por mínimos cuadrados. Así se pudo conocer la relación que existe entre la rigidez del suelo, los coeficientes de Rayleigh introducidos en Plaxis y los coeficientes  $\gamma$  y  $\alpha$  de Barkan.

#### 4.2.5.1. Influencia de la rigidez (100 MPa)

Inicialmente se realizaron diferentes modelos con una rigidez de 100 MPa. Se estudió el comportamiento del coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ ) para los coeficientes de Rayleigh. En la Figura 17 se puede visualizar el comportamiento de  $\gamma$  de Barkan vs  $\beta$  de Plaxis.

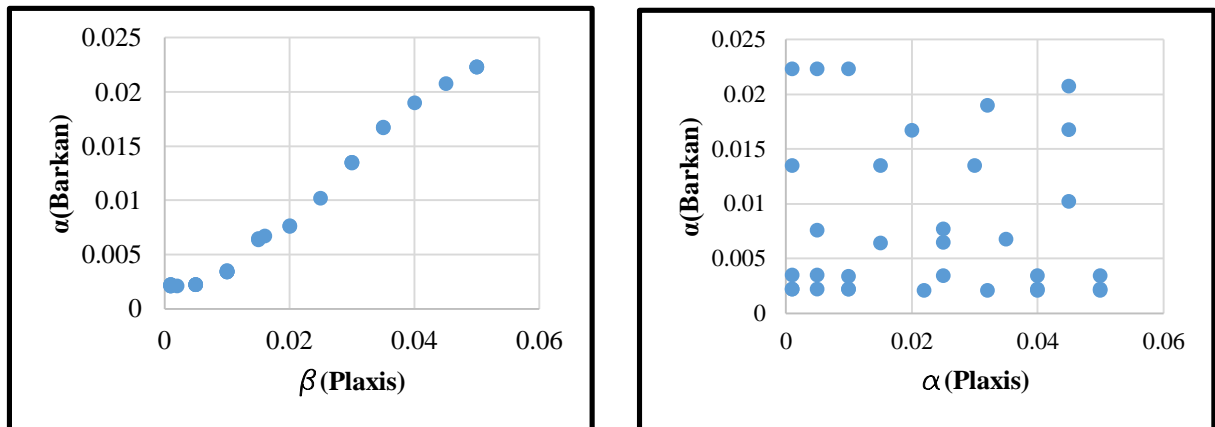
Se puede observar que existe una relación directamente proporcional entre ambos parámetros hasta cierto punto. A medida que aumenta  $\beta$  de Plaxis,  $\gamma$  se acerca a un valor de 2.5.

Se muestra también el comportamiento de  $\gamma$  de Barkan a medida que varía  $\alpha$  de Plaxis. A diferencia de  $\beta$  de Plaxis en la gráfica anterior, no se ve una tendencia clara para  $\alpha$  de Plaxis.



**Figura 17.** Representación gráfica de  $\gamma$  (Barkan) vs  $\beta$  (Plaxis) y  $\gamma$  (Barkan) vs  $\alpha$  (Plaxis).

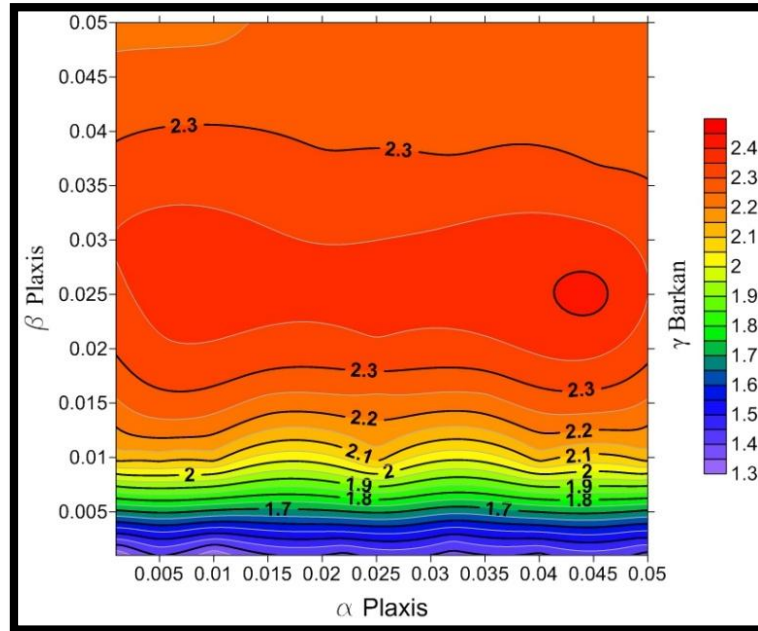
De la misma manera, se estudió el comportamiento del coeficiente de atenuación del material ( $\alpha$ ) y su relación con los coeficientes de Rayleigh de Plaxis. En la Figura 18 se visualiza la variación de  $\alpha$  de Barkan con  $\beta$  de Plaxis. Se puede apreciar que existe una tendencia muy clara ya que a medida que aumenta  $\beta$  de Plaxis aumenta  $\alpha$ . Se visualiza también la variación de  $\alpha$  de Barkan a medida que aumenta  $\alpha$  de Plaxis. Al igual que en el caso anterior se puede apreciar que no existe un efecto claro para este parámetro de Plaxis.



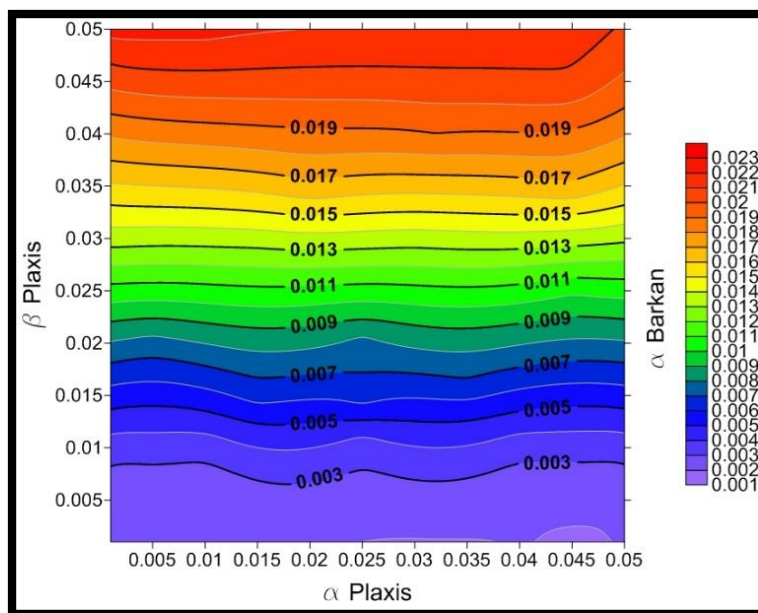
**Figura 18.** Representación gráfica de  $\alpha$  (Barkan) vs  $\beta$  (Plaxis) y  $\alpha$  (Barkan) vs  $\alpha$  (Plaxis).

A partir del programa Surfer 13, se realizaron gráficas de contorno para conocer el comportamiento de los coeficientes de Rayleigh y los parámetros  $\gamma$  y  $\alpha$  de Barkan. Se utilizó el método Krigging para generar una superficie estimada a partir de los puntos introducidos.

En la Figura 19 y Figura 20 se presentan las gráficas de contorno que relacionan los coeficientes de Rayleigh con  $\gamma$  y  $\alpha$  de Barkan respectivamente. En éstas se puede comprobar la poca influencia de  $\alpha$  de Plaxis además del comportamiento dominante de  $\beta$  de Plaxis.



**Figura 19.** Gráfica de contorno que relaciona los coeficientes de Rayleigh con  $\gamma$  de Barkan.



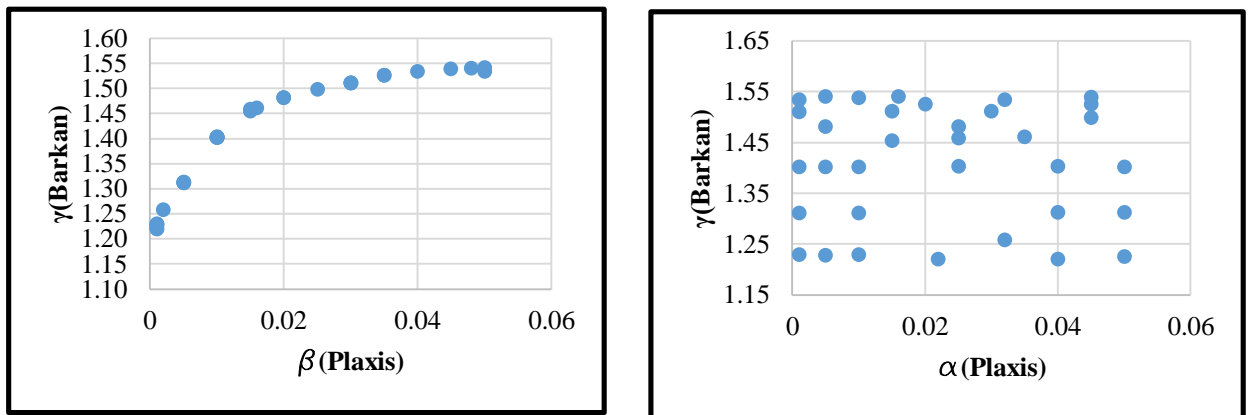
**Figura 20.** Gráfica de contorno que relaciona los coeficientes de Rayleigh con  $\alpha$  de Barkan.

#### 4.2.5.2. Influencia de la rigidez (1000 MPa)

Se estudió el comportamiento del coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ ) y el coeficiente de atenuación del material ( $\alpha$ ) para una rigidez de 1000 MPa.

En la Figura 21 se muestra el comportamiento de  $\gamma$  a medida que varía  $\beta$  y  $\alpha$  de Plaxis respectivamente. Se aprecia que en la primera figura,  $\gamma$  de Barkan aumenta a medida que aumenta  $\beta$  de Plaxis, mientras que en la segunda figura se aprecia que no existe una relación entre  $\gamma$  de Barkan y  $\alpha$  de Plaxis.

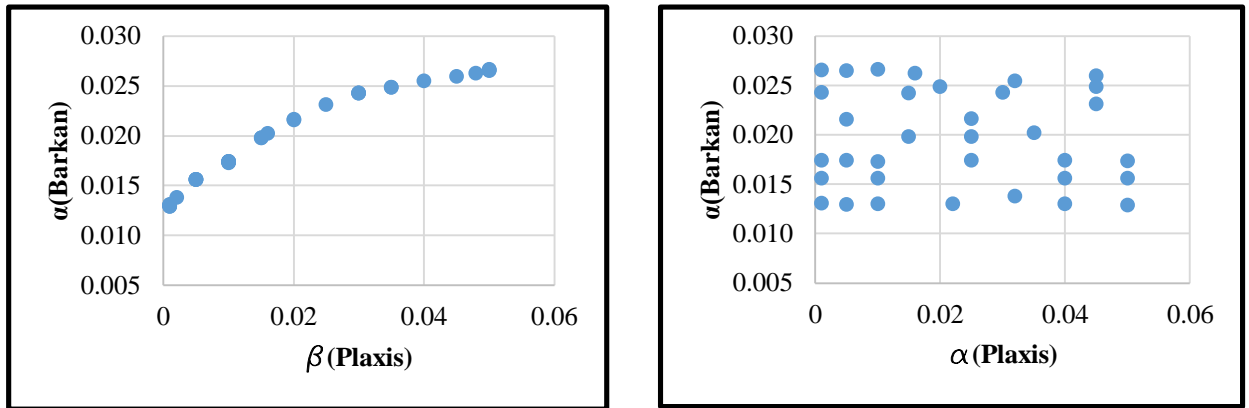
Claramente se puede notar la influencia de  $\beta$  de Plaxis, ya que a medida que éste aumenta, tiende a un  $\gamma$  igual a 1.55.



**Figura 21.** Representación gráfica de  $\gamma$  (Barkan) vs  $\beta$  (Plaxis) y  $\gamma$  (Barkan) vs  $\alpha$  (Plaxis).

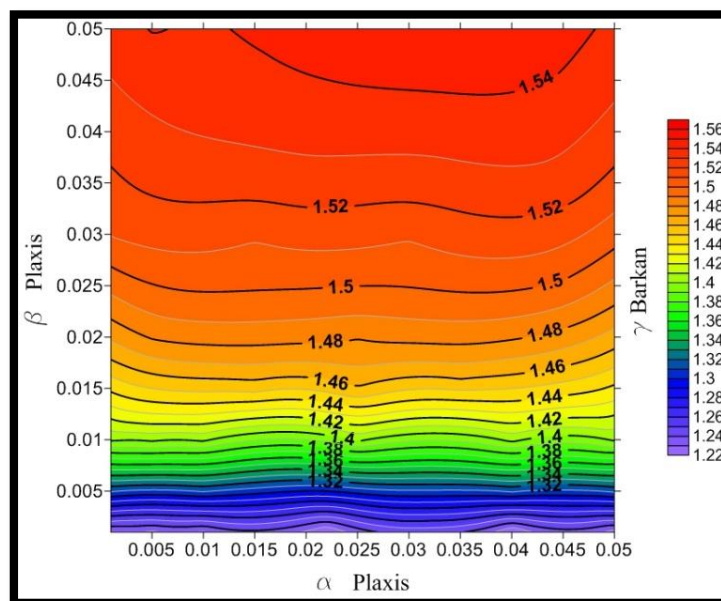
En la Figura 22 se puede apreciar el comportamiento de  $\alpha$  de Barkan a medida que varía  $\beta$  y  $\alpha$  Plaxis. El parámetro  $\beta$  de Plaxis es muy influyente a diferencia del  $\alpha$  de Plaxis. En la primera figura se puede visualizar la tendencia que tiene  $\alpha$  de Barkan (a medida que aumenta  $\beta$  de Plaxis, aumenta  $\alpha$  de Barkan) mientras que en la segunda, se visualiza que  $\alpha$  de Plaxis no tiene una tendencia clara para dicho parámetro.

Es importante resaltar que los valores de  $\gamma$  y  $\alpha$  de Barkan ajustados tienen cierta relación con los obtenidos por investigadores, como se pudo ver en el capítulo anterior.



**Figura 22.** Representación gráfica de  $\alpha$  (Barkan) vs  $\beta$  (Plaxis) y  $\alpha$  (Barkan) vs  $\alpha$  (Plaxis).

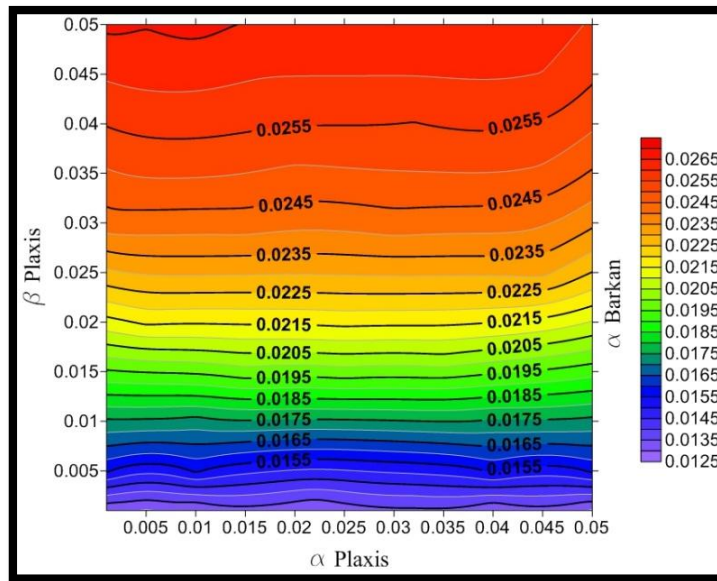
En la Figura 23 se presenta una gráfica de contorno que relaciona los coeficientes de Rayleigh con  $\gamma$  de Barkan, viéndose nuevamente el efecto dominante de  $\beta$  de Plaxis.



**Figura 23.** Gráfica de contorno que relaciona los coeficientes de Rayleigh con  $\gamma$  de Barkan.

En la Figura 24 se presenta una gráfica de contorno que relaciona los coeficientes de Rayleigh con  $\alpha$  de Barkan.



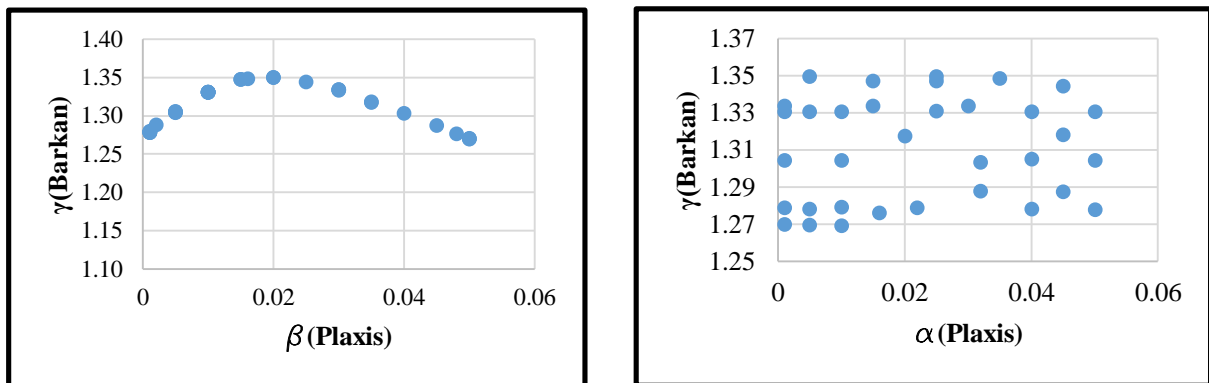


**Figura 24.** Gráfica de contorno que relaciona los coeficientes de Rayleigh con  $\alpha$  de Barkan.

#### 4.2.5.3. Influencia de la rigidez (10000 MPa)

Finalmente, para una rigidez de 10000 MPa se analizó el comportamiento del coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ ) y el coeficiente de atenuación del material ( $\alpha$ ).

La Figura 25 muestra la variación de  $\gamma$  de Barkan conforme aumenta  $\beta$  y  $\alpha$  de Plaxis respectivamente. Nuevamente se puede visualizar que  $\beta$  de Plaxis es dominante en el  $\gamma$  de Barkan. Se puede visualizar además que  $\alpha$  de Plaxis no tiene un efecto claro en este parámetro.

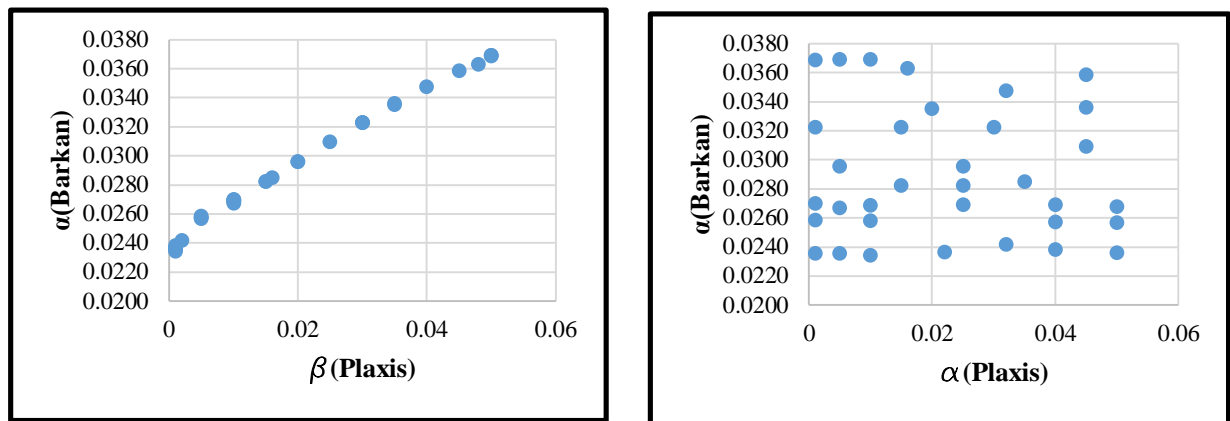


**Figura 25.** Representación gráfica de  $\gamma$  (Barkan) vs  $\beta$  (Plaxis) y  $\gamma$  (Barkan) vs  $\alpha$  (Plaxis).



En la Figura 26 se visualiza el comportamiento de  $\alpha$  de Barkan con  $\beta$  y  $\alpha$  de Plaxis respectivamente.

Se puede apreciar, al igual que en los casos anteriores, que  $\beta$  de Plaxis influye teniendo una tendencia casi lineal. Por otro lado, no existe una tendencia para  $\alpha$  de Barkan y  $\alpha$  de Plaxis.

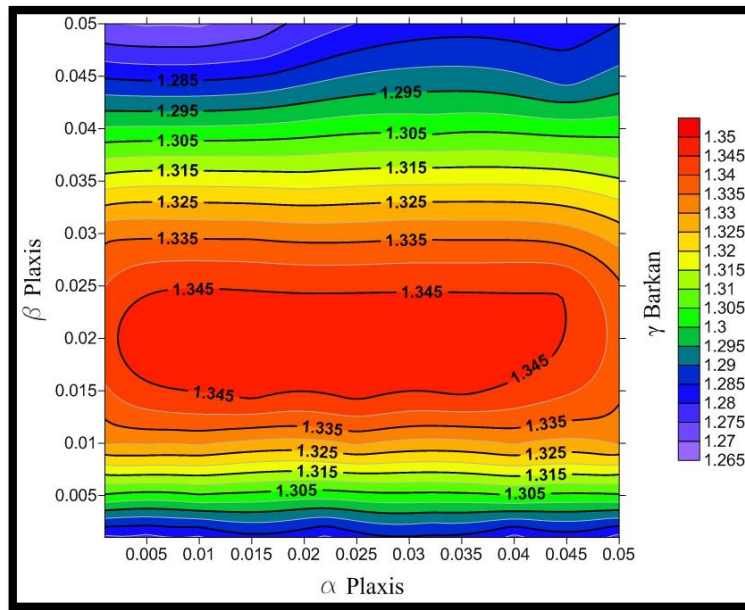


**Figura 26.** Representación gráfica de  $\alpha$  (Barkan) vs  $\beta$  (Plaxis) y  $\alpha$  (Barkan) vs  $\alpha$  (Plaxis).

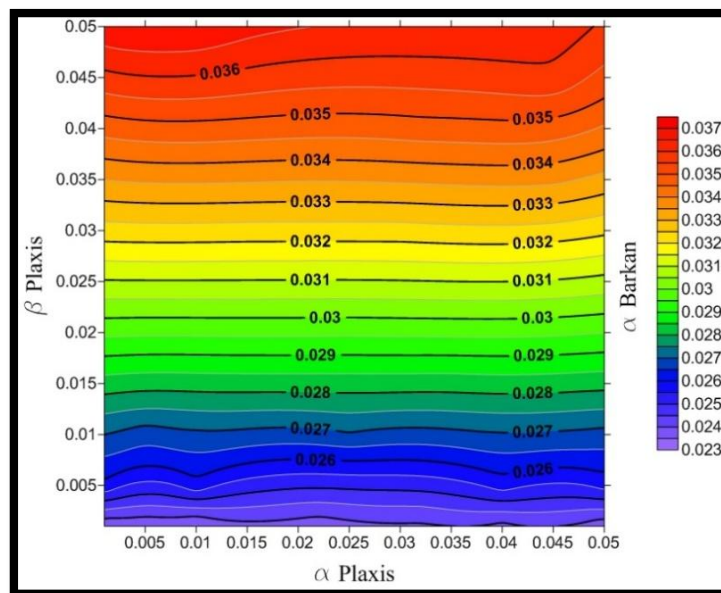
Igualmente, cabe destacar que los valores de  $\gamma$  y  $\alpha$  de Barkan obtenidos tienen cierta relación con los obtenidos por investigadores.

A partir del programa Surfer 13, nuevamente, y utilizando el método Krigging para interpolar y crear la superficie a partir de los puntos evaluados, se realizaron gráficas para conocer el comportamiento de los coeficientes de Rayleigh y los parámetros  $\gamma$  y  $\alpha$  de Barkan.

En la Figura 27 y Figura 28 se presentan las gráficas de contorno que relacionan los coeficientes de Rayleigh con el  $\gamma$  y  $\alpha$  de de Barkan respectivamente.



**Figura 27.** Gráfica de contorno que relaciona los coeficientes de Rayleigh con  $\gamma$  de Barkan.



**Figura 28.** Gráfica de contorno que relaciona los coeficientes de Rayleigh con  $\alpha$  de Barkan.

#### 4.2.5.4. Ajustes realizados

Después de conocer que el comportamiento de  $\beta$  es dominante en el coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ ) y el coeficiente de atenuación del material ( $\alpha$ ) de Barkan, se procedió a conocer la relación que existe con la rigidez y este parámetro de Plaxis,

Por lo tanto, se logró realizar un ajuste entre los parámetros de Barkan a partir de una función que relaciona dichos parámetros con  $\beta$  de Plaxis y la rigidez del suelo (E). Esta función está conformada también por unos coeficientes que fueron empleados para aproximar dichos valores, como se visualiza en la expresión 18 y 19.

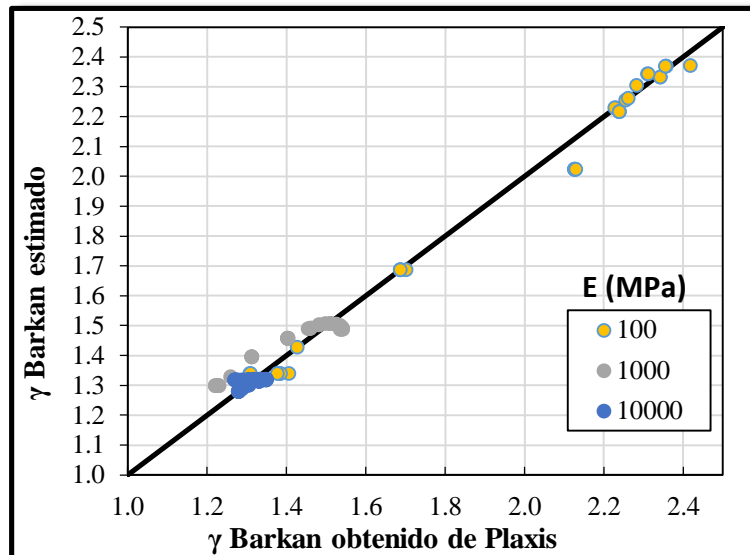
$$\gamma = A + Be^{c \left( \sqrt{\left( \frac{-\ln \beta - a}{b} \right)^2 + \left( \frac{\ln E - a'}{b'} \right)^2} \right)} \quad (18)$$

$$\alpha = a + b \ln E + c \ln \beta + d (\ln E)^2 + e (\ln \beta)^2 + f \ln E \ln \beta \quad (19)$$

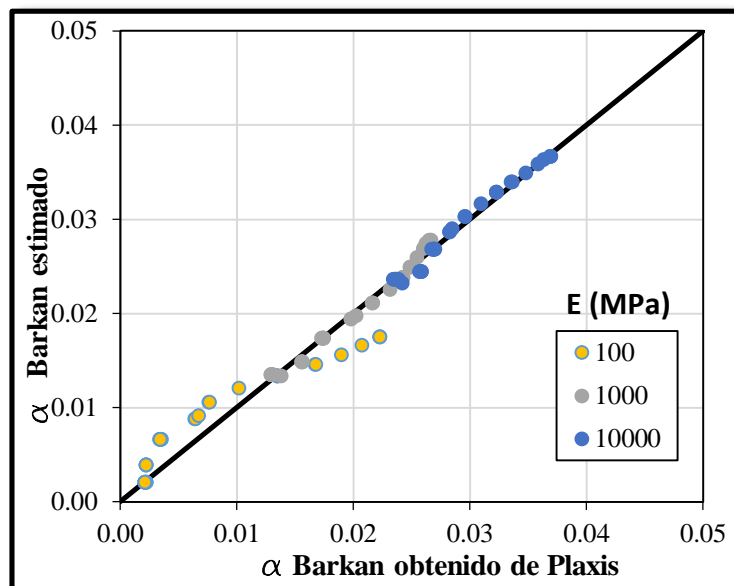
A partir del ajuste de mínimos cuadrados, se pudo determinar que los valores que más acercan a la expresión 18 son  $A = 1.268$ ,  $B = 9.157$ ,  $C = -14.268$ ,  $a = 1.421$ ,  $b = 21.468$ ,  $a' = 3.611$  y  $b' = 10.713$

Para la expresión 19, los valores que mejor ajustan la función son  $a = 0.031$ ,  $b = 0.0055$ ,  $c = -0.0165$ ,  $d = -0.0001$ ,  $e = 0.0012$ ,  $f = 0.00013$

Los valores ajustados para  $\gamma$  o el  $\alpha$  de Barkan (ver anexo C) se pueden visualizar en Figura 29 y Figura 30 respectivamente, al hacer una gráfica con los parámetros ajustados vs los parámetros encontrados con Plaxis.

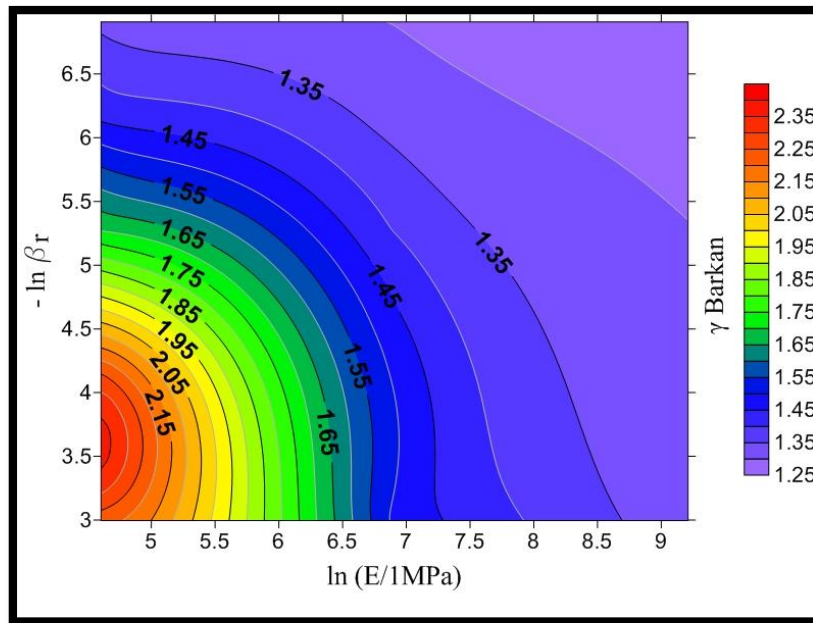


**Figura 29.** Valores de  $\gamma$  de Barkan estimado vs valores  $\gamma$  de Barkan obtenidos en Plaxis.



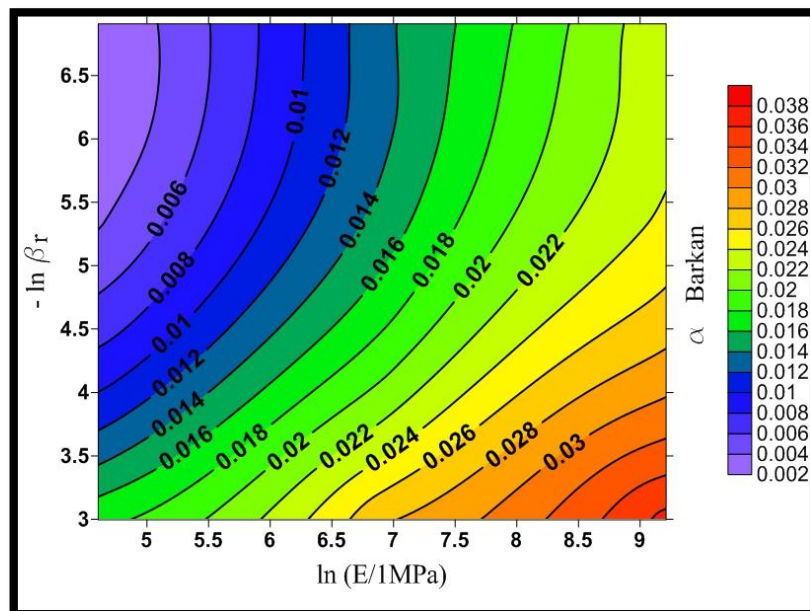
**Figura 30.** Valores de  $\alpha$  de Barkan estimado vs valores  $\alpha$  de Barkan obtenidos en Plaxis.

Luego, tomando los valores nuevos, se procedió a realizar una gráfica de contorno que relaciona la rigidez del suelo,  $\beta$  de Plaxis y el parámetro  $\gamma$  y  $\alpha$  de Barkan. En la Figura 31 se puede visualizar la gráfica que relaciona  $\beta$  de Plaxis, la rigidez y  $\gamma$  de Barkan. En ésta se puede apreciar que mientras menos rígido es el suelo y mayor es el coeficiente  $\beta$  de Plaxis, los valores del  $\gamma$  de Barkan serán mayores.



**Figura 31.** Gráfica de contorno que relaciona  $\beta$  de Plaxis, la rigidez y  $\gamma$  de Barkan.

En la Figura 32 se puede visualizar una gráfica de contorno que relaciona  $\beta$  de Plaxis, la rigidez y  $\alpha$  de Barkan. Se puede apreciar que mientras más rígido es el suelo y el  $\beta$  de Plaxis es mayor, los valores del  $\alpha$  de Barkan son mayores.



**Figura 32.** Gráfica de contorno que relaciona  $\beta$  de Plaxis, la rigidez y  $\alpha$  de Barkan.

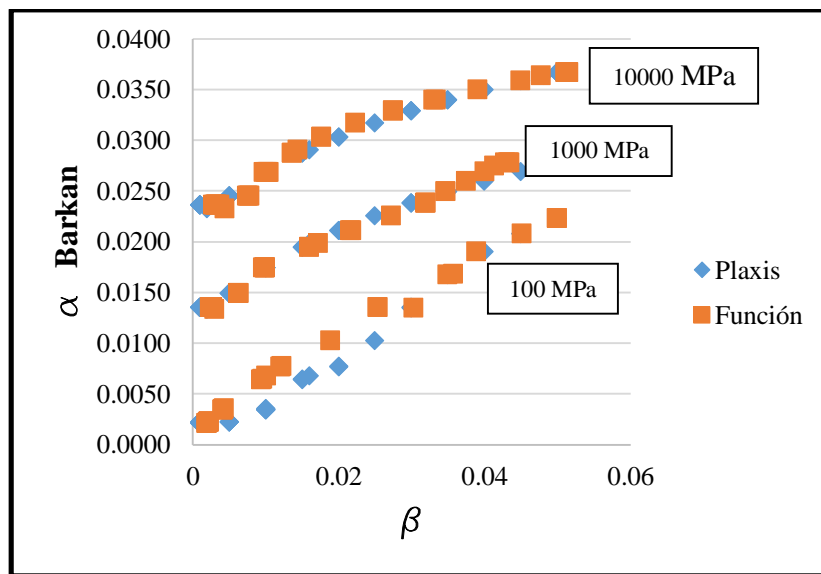
Claramente se puede notar que hay una relación entre la rigidez y el parámetro  $\beta$  de Plaxis con los coeficientes  $\gamma$  y  $\alpha$  de Barkan. Esto además fue posible notarlo al realizar las gráficas en el acápite anterior, ya que las tendencias son muy claras. En el caso del  $\alpha$  de Plaxis no se optó por graficar ya que los resultados arrojados eran muy aleatorios y no se pudo establecer una tendencia. Tampoco se optó por buscar una función que relacionara dicho parámetro de Plaxis con los coeficientes de Barkan y la rigidez.

Para conocer la función que relaciona el coeficiente  $\beta$  de Plaxis con el  $\gamma$  y  $\alpha$  de Barkan, se procedió a tomar las expresiones anteriores y se despejó  $\beta$ . En las expresiones 20 y 21 se pueden observar.

$$\beta = e^{-a-b\left(\sqrt{\left(\frac{1}{C}\ln\left(\frac{\gamma-A}{B}\right)\right)^2-\left(\frac{\ln E-a'}{b'}\right)^2}\right)} \quad (20)$$

$$\beta = e^{\frac{\left(-\sqrt{(c+f\ln E)^2-4e(a+b\ln E+d(\ln E)^2-\alpha)}\right)-c-f\ln E}{2e}} \quad (21)$$

Finalmente, con el objetivo de conocer la efectividad de las funciones presentadas, se procedió a realizar una gráfica tomando una de estas funciones. Por lo tanto se tomó la expresión 21 y se realizó una gráfica “ $\beta$  vs  $\alpha$  de Barkan”. Esta gráfica consistió en comparar  $\beta$  de Plaxis con  $\beta$  obtenido a partir de dicha función. En la Figura 33 se puede visualizar esta comparación para 100 MPa, 1000 MPa y 10000 MPa, dando como resultado una buena aproximación para este parámetro  $\beta$ .



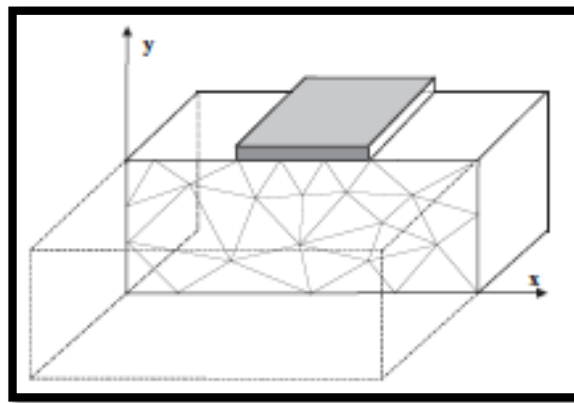
**Figura 33.** Gráfica  $\alpha$  de Barkan vs  $\beta$  de Plaxis y  $\beta$  de la función.

## 4.3. Segundo modelo: paso de un tren en un túnel

### 4.3.1. Consideraciones generales

A diferencia del primer modelo, se considerará un modelo de deformación plana. Este modelo se utiliza en casos de geometrías con una sección transversal aproximadamente uniforme. Además permite suponer que los estados de tensiones y cargas son uniformes a lo largo de una determinada longitud perpendicular a la sección transversal, como se visualiza en la Figura 34 (Plaxis, 2017).

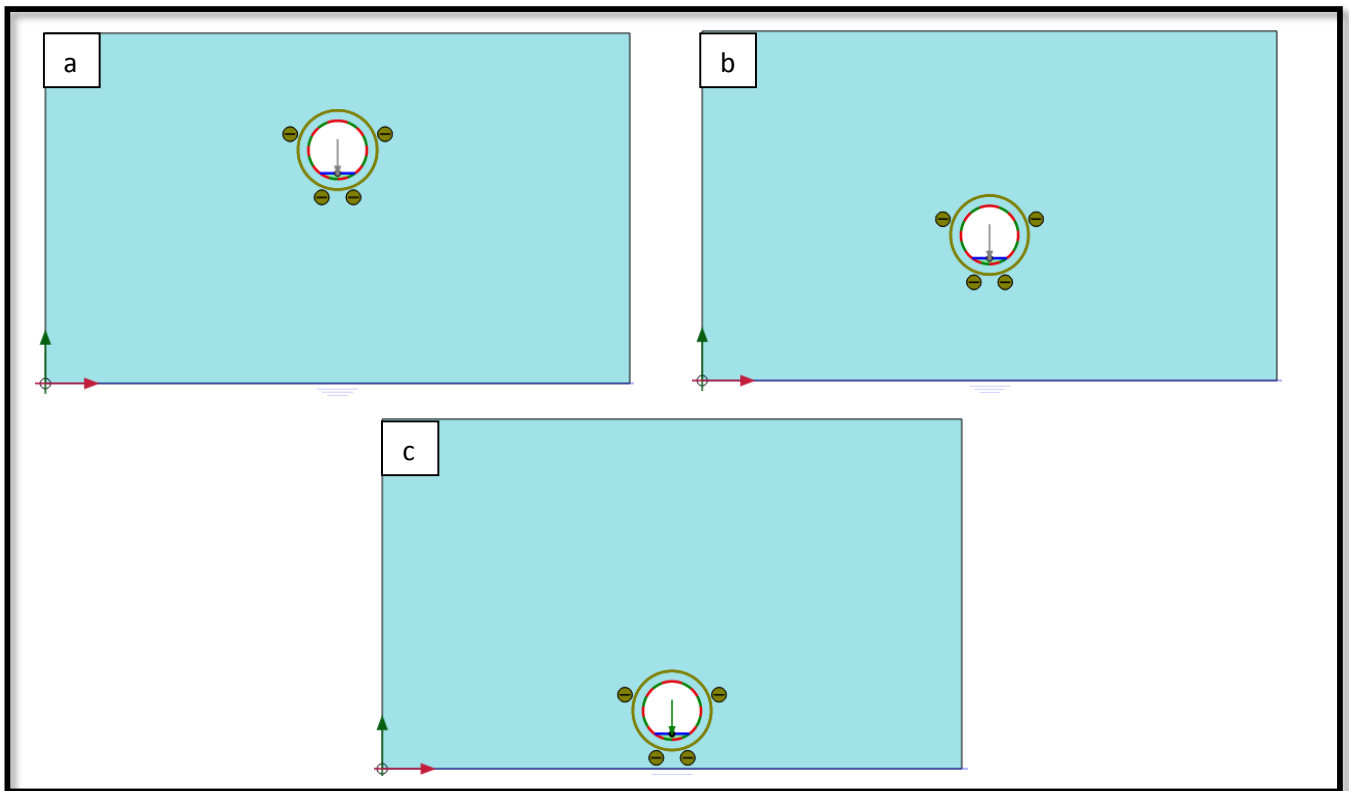
Igualmente se establecerán elementos triangulares de 15 nodos y se establecerán las mismas unidades de medida. La longitud se expresará en metros (m), la fuerza en kilonewtons (kN) y el tiempo en segundos(s).



**Figura 34.** Modelo de deformación plana (Plaxis, 2017).

### 4.3.2. Geometría del modelo

Este modelo se presenta con la misma geometría del modelo 1 (una capa de suelo de 108 m x 60 m), y se considerará inicialmente un túnel de 10 metros de diámetro a 15 metros, luego a 30 metros y finalmente a 45 metros de profundidad (tomando en cuenta la distancia desde la clave a la superficie) como se puede visualizar en la Figura 35. Igualmente se considerará un medio seco y un modelo lineal elástico al considerar que deformaciones debidas a vibraciones son pequeñas y entran en un rango donde dicho modelo se considera razonable. La carga armónica se aplicará en el túnel y representará el paso del tren en un intervalo de tiempo. Esta carga será de 1 kN/m y 5 Hz de frecuencia.



**Figura 35.** Túnel a 15 metros de profundidad (a), 30 metros de profundidad (b) y 45 metros de profundidad (c)

### 4.3.3. Propiedades de los materiales

Las propiedades del suelo serán iguales al modelo 1 (ver Tabla 11). En este caso se considera una capa de balasto debajo de la plataforma donde se aplicará la carga. Como en el modelo anterior, los coeficientes de Rayleigh fueron variados entre 0.001 y 0.05. Además, se supone un modelo elástico y no se toma en cuenta la presencia de agua.

En este caso se consideró una sola rigidez para así estudiar el comportamiento del coeficiente de atenuación geométrica y el coeficiente de atenuación del material.



**Tabla 11.** Propiedades del suelo

<u>Parámetro</u>	<u>Unidades</u>	<u>Suelo</u>	<u>Balasto</u>
<b>Material model</b>		Lineal elástico	Lineal elástico
<b>Drainage type</b>		Drenado	Drenado
<b>Peso específico <math>\gamma</math></b>	kN/m <sup>3</sup>	20	19
<b>Módulo de Young E</b>	MPa	1000	4000
<b>Coefficiente de Poisson <math>\nu</math></b>	-	0.3	0.3
<b>Coefficientes de Rayleigh</b>	-	$\alpha=0.001-0.05$ ; $\beta=0.001-0.05$	0.01
		Ver anexo B	

En el anexo B se pueden visualizar las combinaciones de los coeficientes de Rayleigh utilizadas en los modelos. Para este modelo, se realizaron un total de 15 combinaciones para cada geometría.

En la Tabla 12 se muestran las propiedades de los elementos que conforman el túnel.

Después de asignar las propiedades a los materiales y establecer las condiciones de contorno se procedió a realizar el mallado de elementos finitos.

**Tabla 12.** Propiedades de los elementos del túnel

<u>Parámetro</u>	<u>Unidades</u>	<u>Plataforma túnel</u>	<u>Revestimiento túnel</u>
<b>Material Type</b>		Elástico	Elástico
<b>Rigidez normal EA</b>	MN/m	3490	8000
<b>Rigidez a flexión EI</b>	MN m <sup>2</sup> /m	655	107
<b>Espesor(d)</b>	m	1.50	0.40
<b>Peso (w)</b>	kN/m/m	29.43	9.60
<b>Coefficiente de Poisson (<math>\nu</math>)</b>		0.33	0.20
<b>Coefficientes de Rayleigh</b>		$\alpha$ y $\beta = 0.01$	$\alpha$ y $\beta = 0.01$

#### 4.3.4. Fases de cálculo

En estas fases se procede a conocer el efecto de las vibraciones que se generan ante el paso del tren. Para esto el cálculo se divide en seis fases. La primera consiste en la fase inicial, las próximas tres fases son plásticas y consisten en la construcción del túnel. Las dos últimas consisten en fases dinámicas que simula el paso del tren.

##### **Fase inicial**

En esta fase se verifica que todos los elementos se encuentren desactivados.

##### **Fase 1: Excavación del túnel**

La excavación del túnel se procede a realizar en esta fase. No se activa el revestimiento ni la interface. Se deja que se relaje 5% y se colocan los desplazamientos en cero,

##### **Fase 2. Colocación de revestimiento**

Se procede a activar las placas y la interface alrededor del túnel.

##### **Fase 3: Construcción de la solera**

Después de construir el revestimiento, se procede a construir la solera y la plataforma por donde transitará el tren. Se activa la capa con la propiedad del balasto.

##### **Fase 4: Paso del tren**

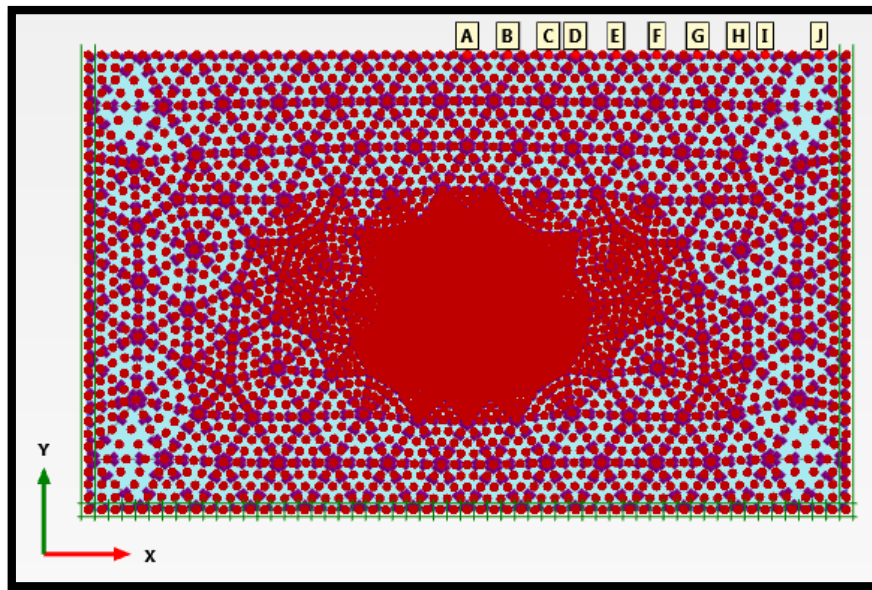
En esta fase de análisis dinámico se simula el paso del tren por medio de una carga armónica con una duración de 1.5 segundos, considerando 1000 pasos de tiempo.

##### **Fase 5: Desactivación de la carga armónica**

La carga armónica se desactiva por un tiempo 2.5 segundos y se consideran 1000 pasos de tiempo por igual.

Luego, se eligen los puntos de interés que se quieren analizar. Éstos se encontrarán ubicados en la superficie y se seleccionan en las siguientes coordenadas: A (50, 60), B (55.36, 60), C (60.71, 60), D (64.29, 60), E (69.64, 60), F (75.00, 60), G (80.36, 60), H (85.71, 60), I (89.29, 60), J (96.43, 60) como se puede apreciar en la Figura 36.

Con el estudio de estos puntos, se buscará conocer las amplitudes máximas de las velocidades y así resolver la expresión de Barkan, conociendo el comportamiento del coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ ) y del coeficiente de atenuación del material ( $\alpha$ ).



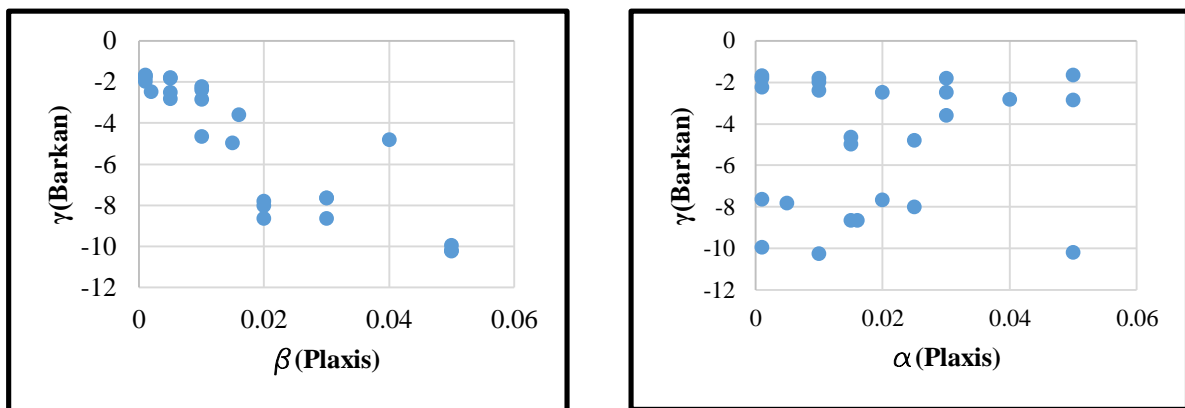
**Figura 36.** Puntos a evaluar en el modelo 2.

#### 4.3.5. Resultados

##### 4.3.5.1. Túnel a 15 metros de profundidad

En el caso del modelo que representaba el paso de tren en un túnel a 15 metros de profundidad, se analizó el comportamiento del coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ ) y el coeficiente de atenuación del material ( $\alpha$ ) para los diferentes coeficientes de Rayleigh de Plaxis.

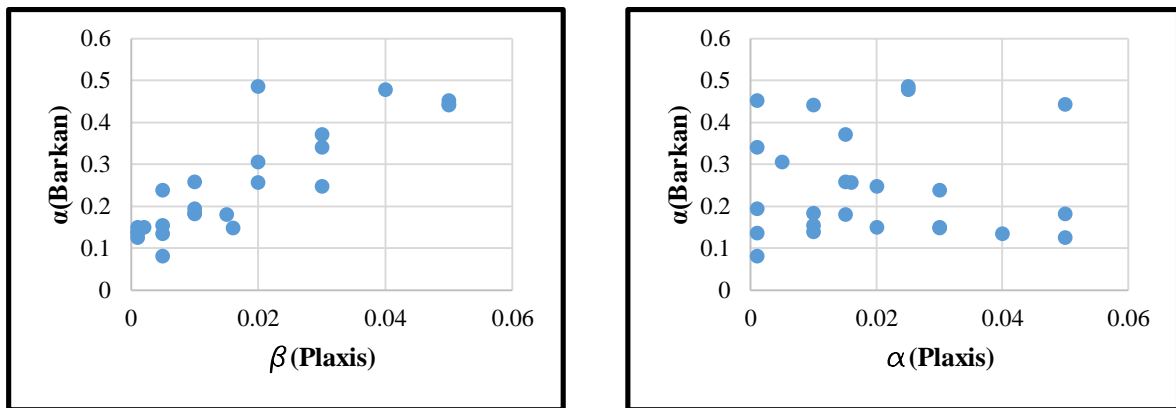
En la Figura 37, para  $\gamma$  de Barkan, se puede notar que los coeficientes de Rayleigh no afectan a este valor y no se ajusta a ningún patrón de comportamiento como fue el caso del modelo 1.



**Figura 37.** Representación gráfica de  $\gamma$  (Barkan) vs  $\beta$  (Plaxis) y  $\gamma$  (Barkan) vs  $\alpha$  (Plaxis).

Si comparamos estos valores de  $\gamma$  de Barkan con los obtenidos por investigadores (planteados en el capítulo anterior), se puede notar que el ajuste arroja valores que no son habituales.

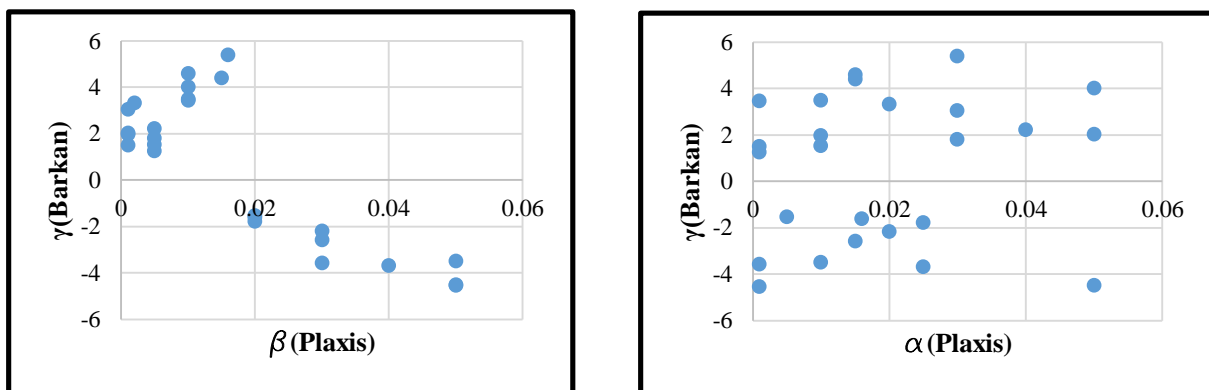
$\alpha$  de Barkan, al igual que el caso anterior, no presenta un comportamiento típico ante los cambios de los coeficientes de Rayleigh de Plaxis. Como se puede apreciar en la Figura 38, no existe ninguna tendencia para ambos parámetros. Por lo tanto, estos valores obtenidos para  $\alpha$  de Barkan resultan poco habituales a los obtenidos por los investigadores.



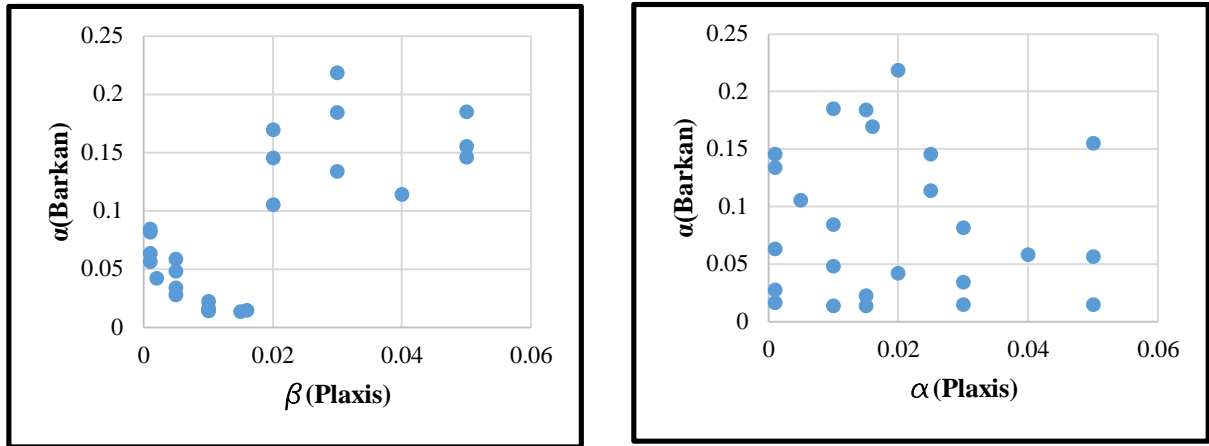
**Figura 38.** Representación gráfica de  $\alpha$  (Barkan) vs  $\beta$ (Plaxis) y  $\alpha$  (Barkan) vs  $\alpha$ (Plaxis).

#### 4.3.5.2. Túnel a 30 metros de profundidad

En la Figura 39 se puede visualizar el comportamiento de  $\gamma$  de Barkan. Se puede observar que los valores de  $\gamma$  de Barkan tienden a tomar valores negativos y positivos. Además no siguen ninguna tendencia. Lo mismo ocurre para  $\alpha$  de Barkan excepto que no toman valores negativos (ver Figura 40).



**Figura 39.** Representación gráfica de  $\gamma$  (Barkan) vs  $\beta$ (Plaxis) y  $\gamma$  (Barkan) vs  $\alpha$ (Plaxis).

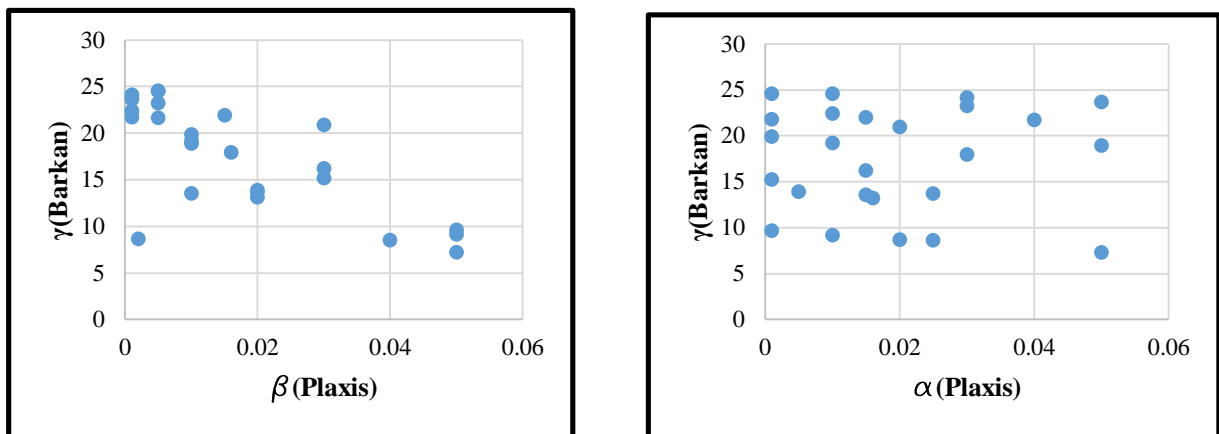


**Figura 40.** Representación gráfica de  $\alpha$  (Barkan) vs  $\beta$  (Plaxis) y  $\alpha$  (Barkan) vs  $\alpha$  (Plaxis).

Cabe destacar que los valores de  $\gamma$  y  $\alpha$  de Barkan, resultan ilógicos y poco habituales, al ser comparados con los valores típicos obtenidos.

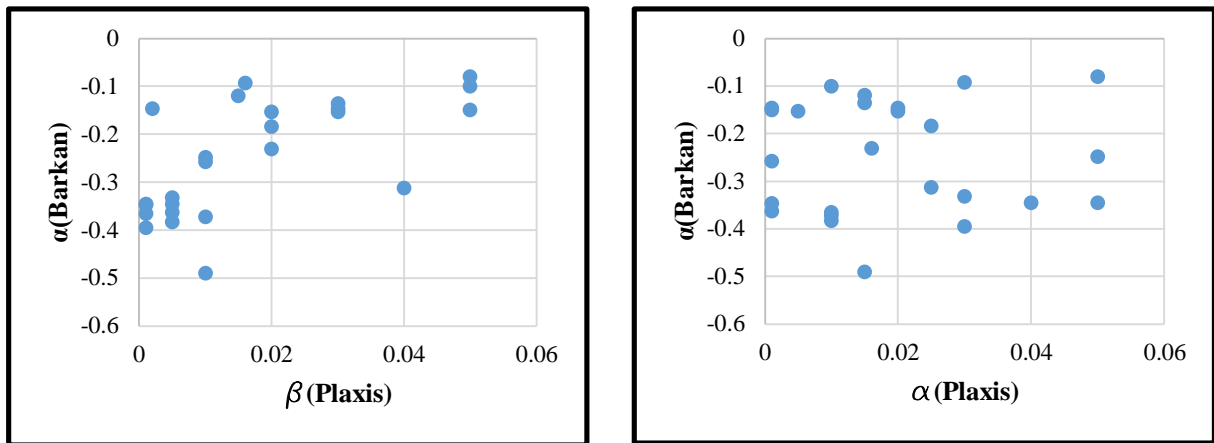
#### 4.3.5.3. Túnel a 45 metros de profundidad

Al igual que en los dos casos anteriores,  $\gamma$  de Barkan no tiene una tendencia ante la variación de los coeficientes de Rayleigh de Plaxis. Este comportamiento se puede visualizar en la Figura 41.



**Figura 41.** Representación gráfica de  $\gamma$  (Barkan) vs  $\beta$  (Plaxis) y  $\gamma$  (Barkan) vs  $\alpha$  (Plaxis).

Por otro lado, en la Figura 42 se observa que los coeficientes de Rayleigh no influyen tampoco en el  $\alpha$  de Barkan, llegando a arrojar valores aleatorios.



**Figura 42.** Representación gráfica de  $\alpha$  (Barkan) vs  $\beta$  (Plaxis) y  $\alpha$  (Barkan) vs  $\alpha$  (Plaxis).

Igualmente, en este caso, los valores de  $\gamma$  y  $\alpha$  de Barkan obtenidos resultan poco habituales. A esto se suma que el túnel se encuentra muy cerca del contorno inferior y pueden ocurrir reflexiones que alteren los valores.

Finalmente, para el modelo del túnel (en todos los casos), los resultados obtenidos son muy diferentes a los obtenidos en el modelo de la carga en superficie. Esto, probablemente, se debe a la señal que genera la carga del túnel, la cual puede ser más compleja y generar reflexiones indeseadas.

#### 4.4. Tercer modelo: método de reducción de vibraciones.

##### 4.4.1. Consideraciones generales

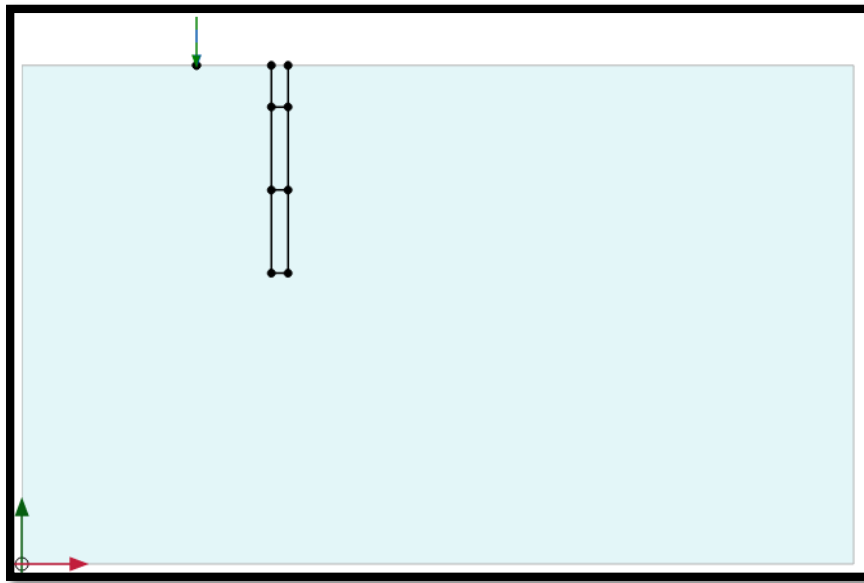
En este modelo se analizará un método de reducción de vibraciones. Se modelará una zanja a 5 metros de distancia de una carga que se aplica en superficie. Esta zanja se modelará con bentonita, concreto, abierta y otro material los cuales tendrán diferentes propiedades. Aparte de modelarlo con una carga en superficie, se considerará también una carga a 10 metros de profundidad.

Al igual que en el modelo 2, se considera un modelo de deformación plana y se utilizan elementos de 15 nodos para la discretización. En cuanto a la unidades de medida, la longitud se expresará en metros (m), la fuerza en kilonewtons (kN) y el tiempo en segundos(s). No se considerará agua y se utilizará un modelo elástico lineal.

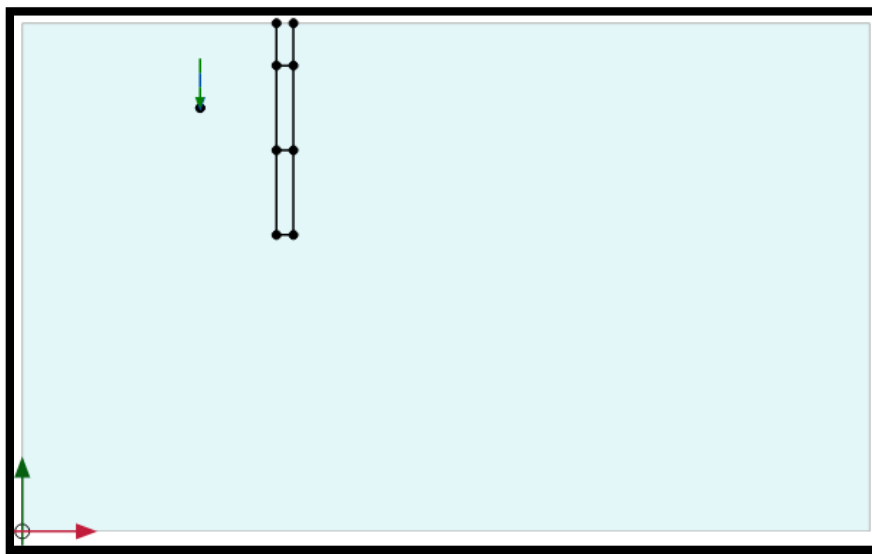
#### 4.4.2. Geometría del modelo

Estos modelos tendrán la misma geometría del modelo 1 y 2 (una capa de suelo de 108 m x 60 m). Además se considerará una zanja de 2 metros de ancho a 5 metros de distancia de la fuente y se modelarán los materiales de relleno expuestos anteriormente a 5, 15 y 25 metros de profundidad (Ver Figura 43 y Figura 44).

La carga aplicada en superficie y profundidad fue de 1 kN/m. La primera se encuentra en coordenada (21,60) y la segunda en la coordenada (21, 50). La zanja tendrá las siguientes coordenadas: (30,60), (30,55), (30, 45), (30, 35), (32, 35) (32, 45), (32, 55) y (32, 60).



**Figura 43.** Modelo con carga en superficie.



**Figura 44.** Modelo con carga a 10 metros de profundidad.

#### 4.4.3. Propiedades de los materiales

Las propiedades del suelo serán iguales a las del modelo 1 y modelo 2. Los coeficientes de Rayleigh se consideraron igual a 0.1 para  $\alpha$  y  $\beta$  y se supone un modelo elástico lineal para ambos materiales.

Los materiales que se utilizarán como relleno en las zanjas son bentonita y concreto. Además se ha considerado otro material con una rigidez intermedia entre la bentonita y el concreto y un coeficiente de Poisson de 0.4. Sus propiedades se pueden visualizar en la Tabla 13.

**Tabla 13.** Propiedades de los materiales.

<u>Parámetro</u>	<u>Unidades</u>	<u>Suelo</u>	<u>Bentonita</u>	<u>Otro material</u>	<u>Concreto</u>
<b>Material model</b>		Lineal elástico	Lineal elástico	Lineal elástico	Lineal elástico
<b>Drainage type</b>		Drenado	Drenado	Drenado	Drenado
<b>Peso específico <math>\gamma</math></b>	kN/m <sup>3</sup>	20	15	9.8	24
<b>Módulo de Young E</b>	MPa	1000	60	2000	27000
<b>Coeficiente de Poisson <math>\nu</math></b>	-	0.3	0.3	0.40	0.15

#### 4.4.4. Fases de cálculo

Para conocer el efecto de las vibraciones que se generan ante el paso del tren, se procede a dividir el cálculo en cuatro fases. La primera consiste en la fase inicial, luego una fase plástica que consiste en la activación del relleno y la construcción de las zanjas. Las dos últimas son dinámicas y se simula el paso del tren.



### **Fase inicial**

En esta fase se verifica que todos los elementos se encuentren desactivados.

### **Fase 1: Activación el material de relleno**

Se procede a activar el material de relleno a 5 metros, 15 metros o 25 metros de profundidad.

### **Fase 2: Activación de la carga**

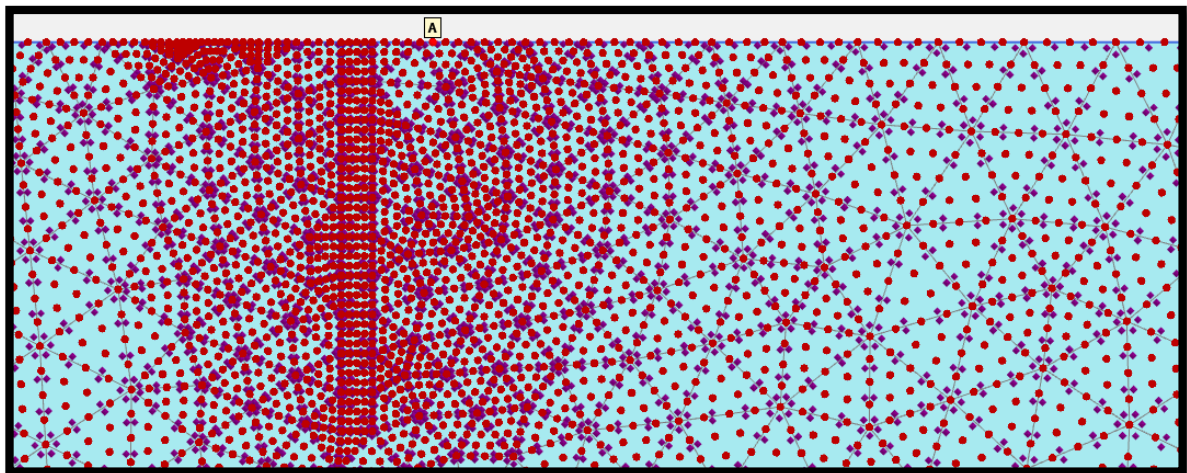
Se simula el paso del tren por medio de una carga armónica con una duración de 1.5 segundos. Se consideran 1000 pasos de tiempo.

### **Fase 3: Desactivación de la carga**

La carga armónica se desactiva por un tiempo de 2.5 segundos y se consideran 1000 pasos de tiempo por igual.

El punto de interés a analizar se encuentra en la superficie en la coordenada (35.89, 60). Éste estará a 3.89 metros de la barrera (ver Figura 45). Con el estudio de este punto, se buscará conocer las amplitudes máximas de las aceleraciones y saber cuál barrera es más eficiente para atenuar las vibraciones.

Este proceso se repitió para 5 Hz, 15 Hz y 25 Hz, tanto en superficie como en profundidad.



**Figura 45.** Punto a evaluar.

#### **4.4.5. Resultados**

##### **4.4.5.1. Carga en superficie.**

Después de analizar los modelos, se procedió a graficar la relación de la aceleración vertical máxima y la aceleración vertical máxima (ver anexo D) sin zanja en función de la profundidad. Estas gráficas se hicieron con el objetivo de hacer comparaciones y evaluar cuál zanja resulta más eficiente para atenuar las vibraciones.

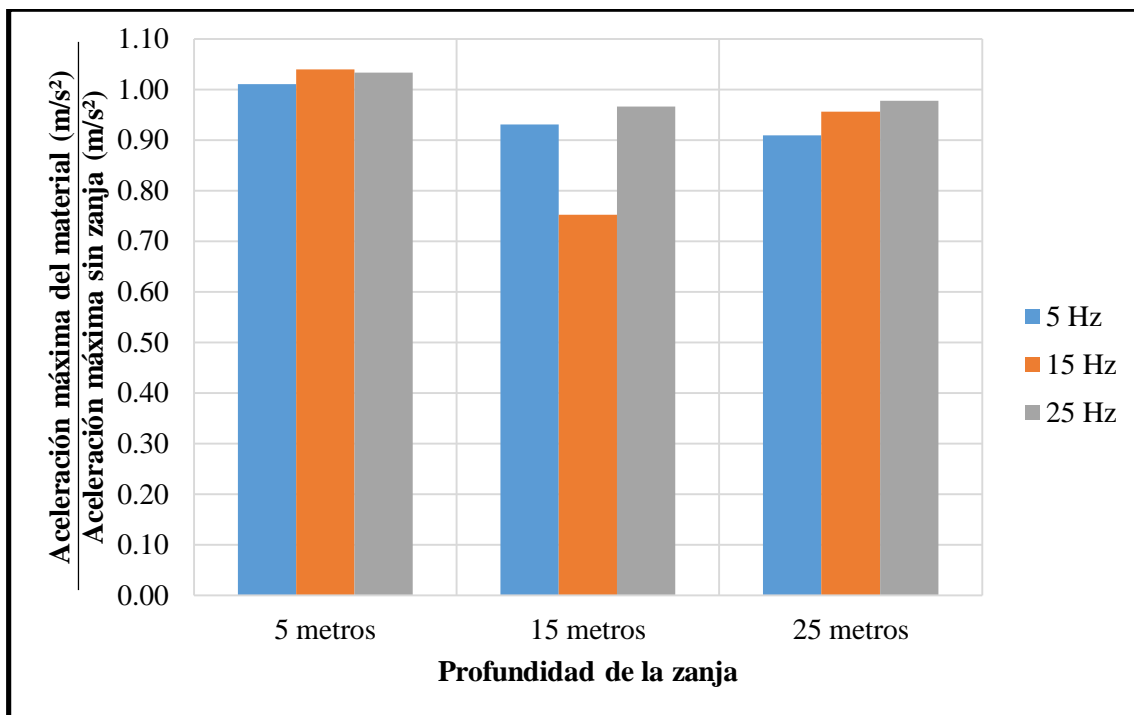
Desde la Figura 46 a la Figura 49 se muestran la relación de estas aceleraciones en función de la profundidad para la zanja de bentonita, la zanja del otro material, la zanja de concreto y zanja la abierta respectivamente. Éstas fueron evaluadas en el punto mencionado y para una frecuencia de 5 Hz, 15 Hz y 25 Hz.

Se visualiza en la Figura 46 que para todas las frecuencias, la zanja de bentonita a 5 metros de profundidad tiende a amplificar las aceleraciones. Sin embargo, para 15 y 25 metros de profundidad y frecuencias de 5 Hz, 15 Hz y 25 Hz ocurre cierta atenuación pero no es tan significativa.

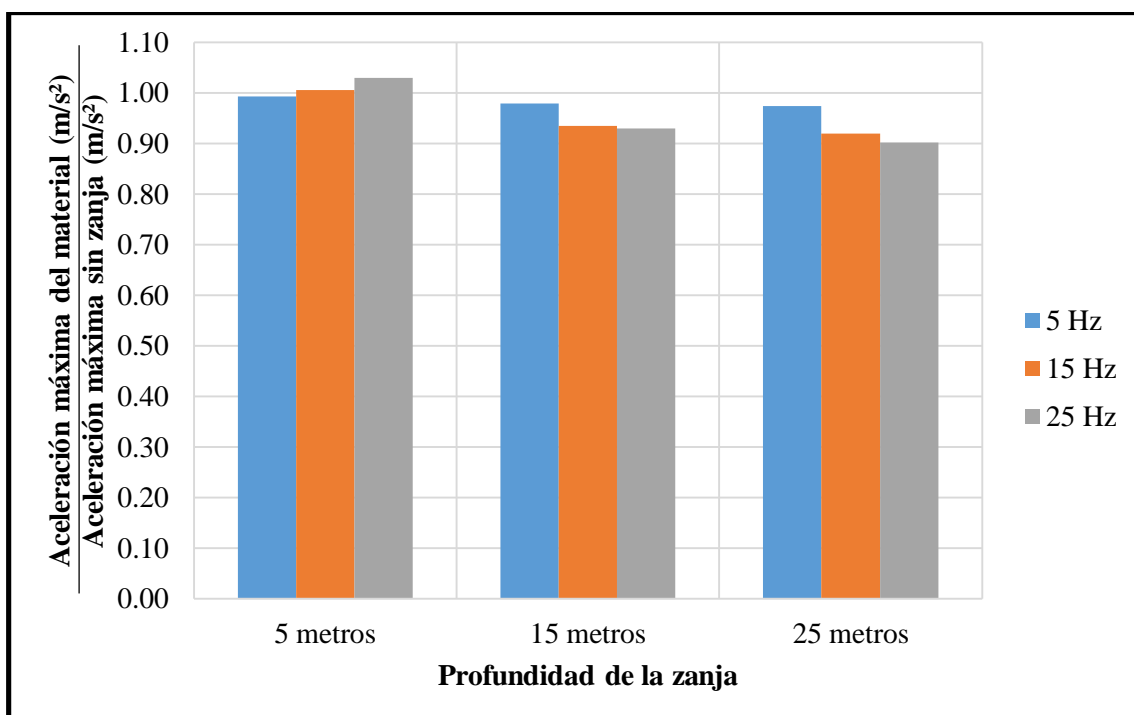
Por otro lado se puede apreciar que la zanja rellena con otro material no resulta tan útil para atenuar vibraciones. Para 15 y 25 metros de profundidad y todas las frecuencias, estas zanjas brindan mayor atenuación. Para 5 metros y una frecuencia de 25 Hz, presenta amplificación de las vibraciones (ver Figura 47).

En cuanto a la zanja de concreto, se puede observar que es útil para atenuar vibraciones a pesar de que la atenuación que presenta para 5, 15 y 25 metros de profundidad y las frecuencias de 5 Hz, 15 Hz y 25 Hz es similar (ver Figura 48).

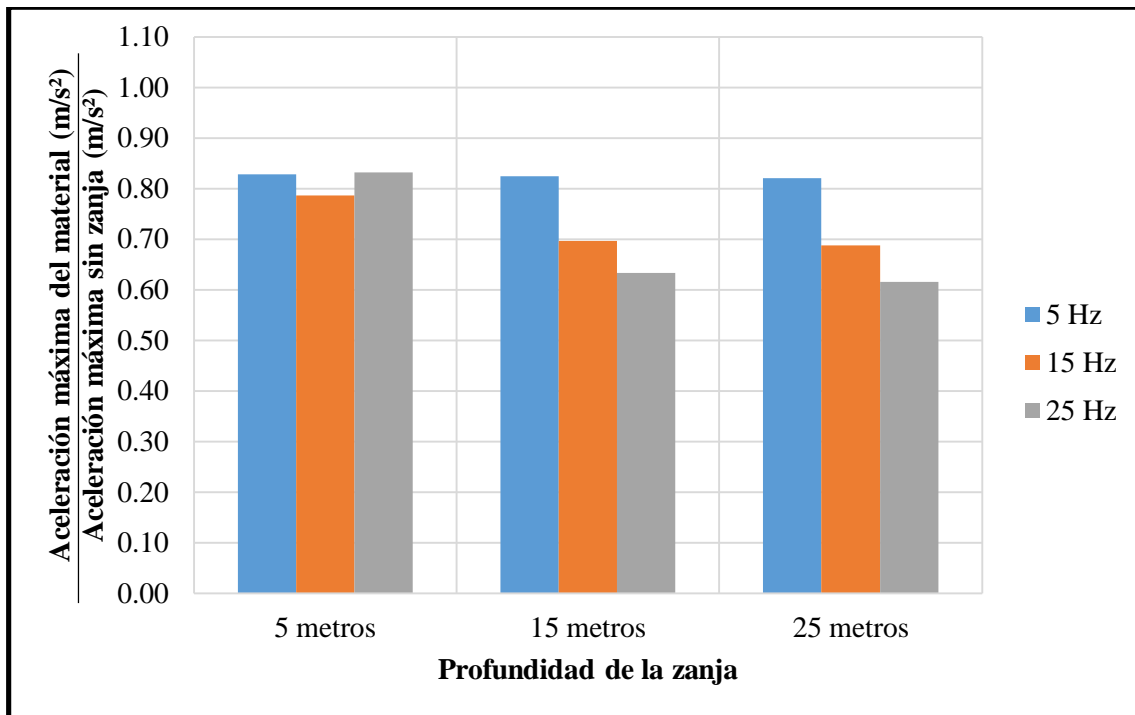
Finalmente, se puede apreciar en la Figura 49 que en todos los casos, la zanja abierta resulta más útil para atenuar vibraciones. Esto afirma lo planteado en el acápite 2.3.2. Se visualiza que a medida que aumenta la profundidad, aumenta la eficacia de ésta, resultando muy eficaz para las frecuencias de 5 Hz, 15 Hz y 25 Hz.



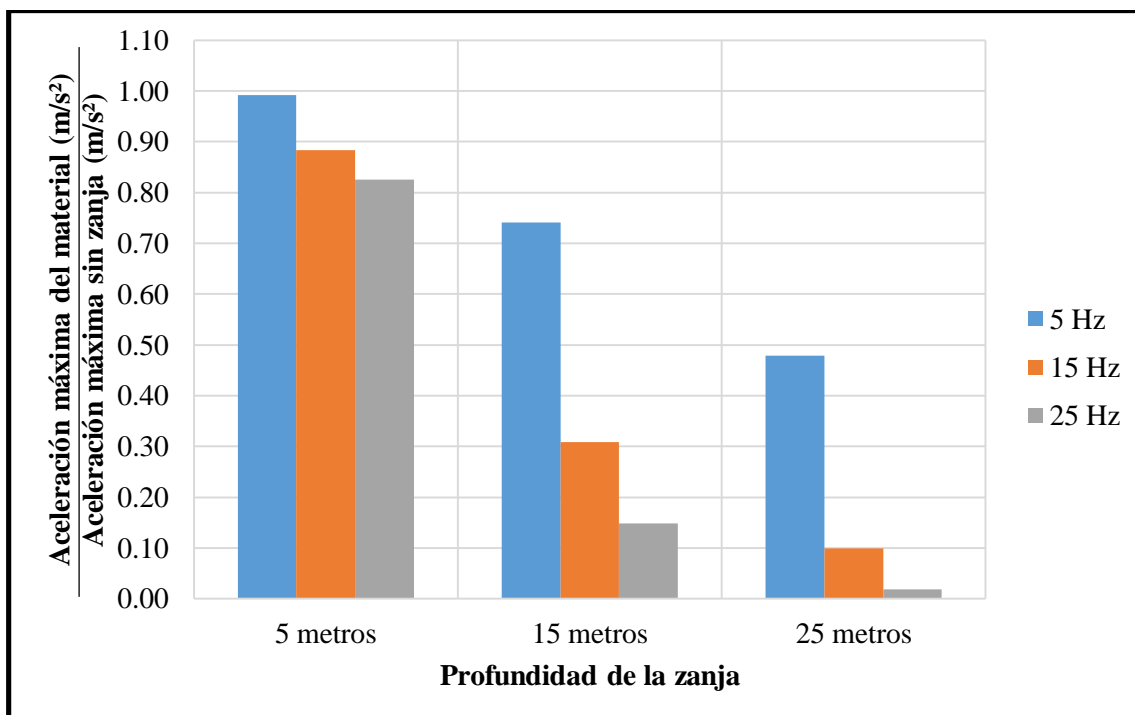
**Figura 46.** Relación de la aceleración máxima con zanja de bentonita y la aceleración máxima sin zanja.



**Figura 47.** Relación de la aceleración máxima con zanja de otro material y la aceleración máxima sin zanja.



**Figura 48.** Relación de la aceleración máxima con zanja de concreto y la aceleración máxima sin zanja.



**Figura 49.** Relación de la aceleración máxima con zanja abierta y la aceleración máxima sin zanja.

#### **4.4.5.2. Carga a 10 metros de profundidad.**

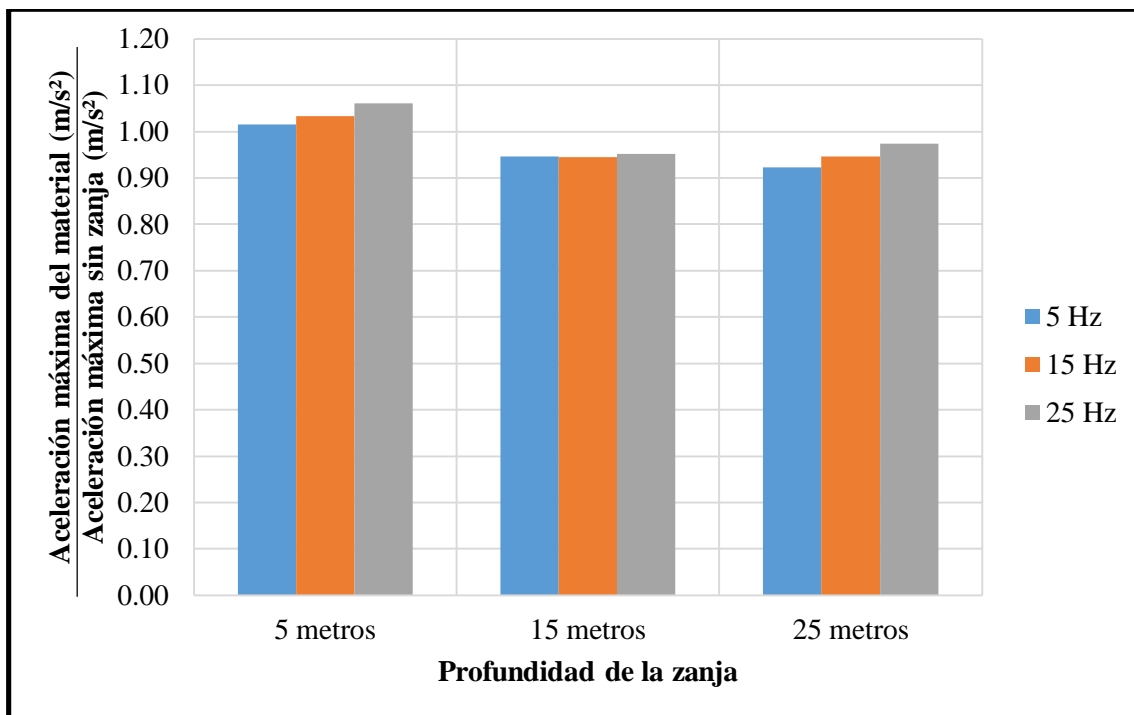
Desde la Figura 50 a la Figura 53 se muestran la relación de la aceleración máxima y la aceleración máxima sin zanja (ver anexo D) en función de la profundidad para la zanja de bentonita, la zanja de otro material, la zanja de concreto y la zanja abierta respectivamente.

En la Figura 50, se puede visualizar que las zanjas de bentonita tienden a amplificar las vibraciones para 5 metros de profundidad y frecuencias de 5 Hz, 15 Hz y 25 Hz. Por otro lado, las atenuaciones de éstas son mínimas para las zanjas de 15 y 25 metros de profundidad.

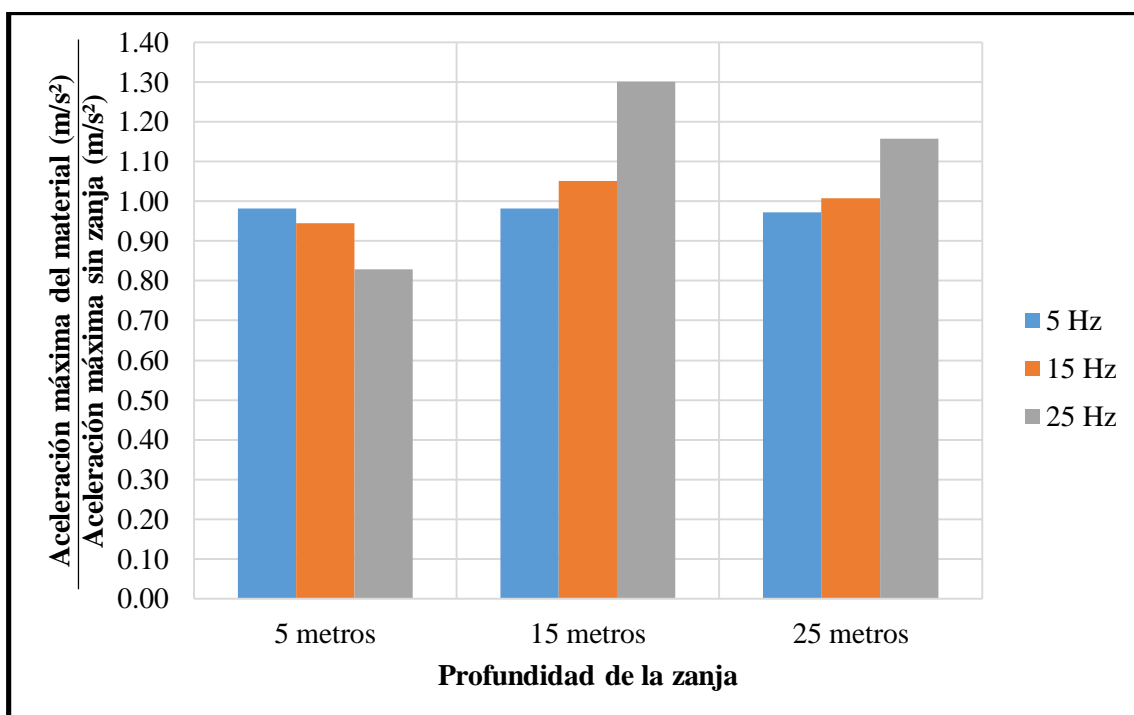
Por otro lado, en la Figura 51, se puede observar que la zanja del otro material no resulta muy útil para atenuar las vibraciones. Para 15 Hz y 25 Hz (15 y 25 metros de profundidad) se amplifican estas vibraciones.

Las zanjas de concreto, para 5 Hz y 15 Hz, resultan eficientes para atenuar vibraciones para 5, 15 y 25 metros de profundidad. Para 25 Hz (15 y 25 metros de profundidad), se puede apreciar una amplificación de éstas (ver Figura 52).

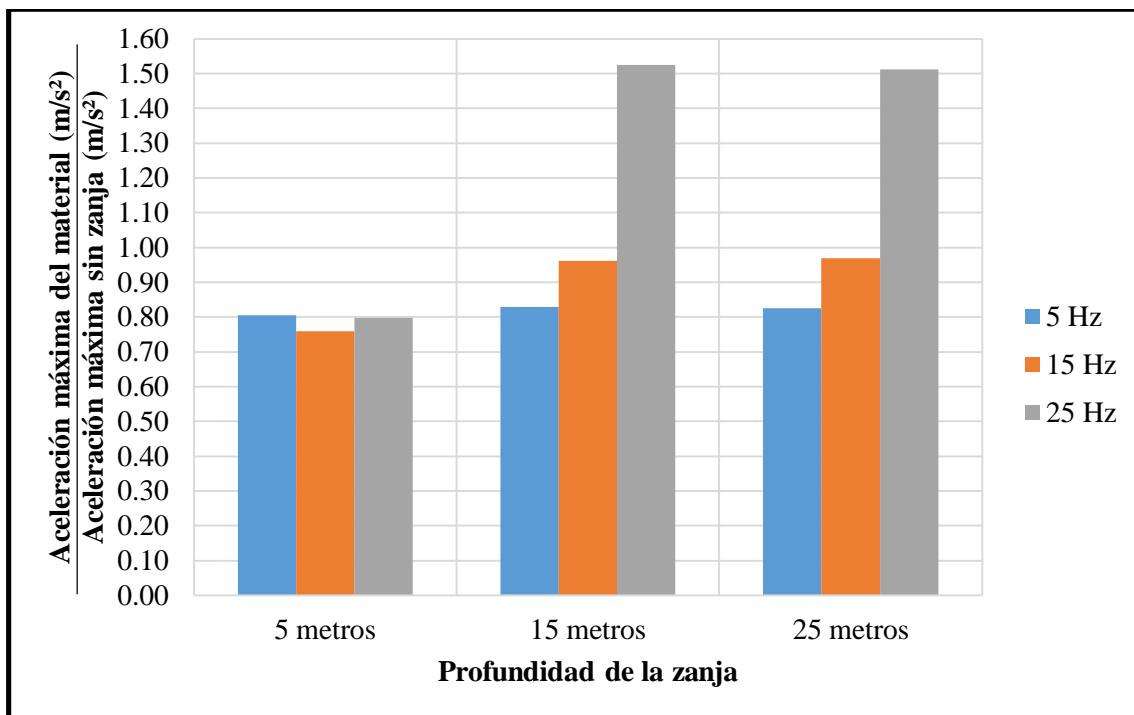
La zanja abierta, como se visualiza en la Figura 53, tiene un gran efecto en la atenuación de vibraciones. A medida que aumenta la profundidad de ésta, la atenuación es mayor. Las frecuencias de 15 Hz y 25 Hz tienden a amplificar las aceleraciones para una zanja de 5 metros de profundidad.



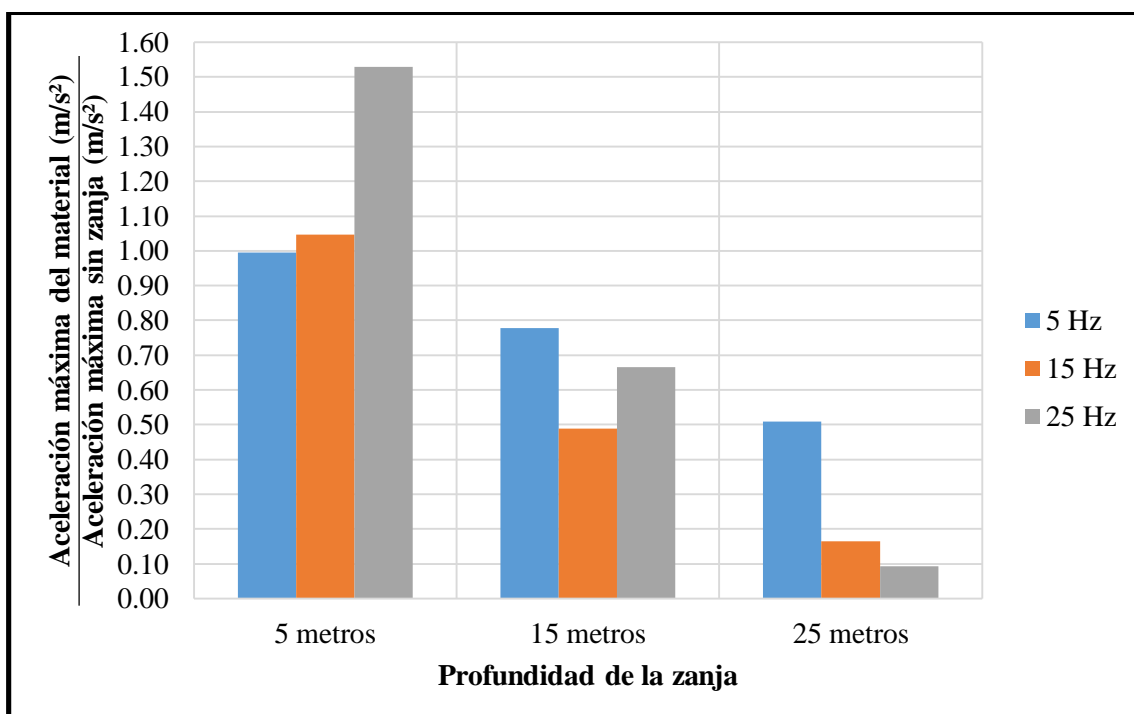
**Figura 50.** Relación de la aceleración máxima con zanja de bentonita y la aceleración máxima sin zanja.



**Figura 51.** Relación de la aceleración máxima con zanja de otro material y la aceleración máxima sin zanja.



**Figura 52.** Relación de la aceleración máxima con zanja de concreto y la aceleración máxima sin zanja.



**Figura 53.** Relación de la aceleración máxima con zanja abierta y la aceleración máxima sin zanja.

## Capítulo 5: Conclusiones

En este trabajo final de máster se buscó estudiar el efecto de los coeficientes de Rayleigh ( $\alpha$  y  $\beta$ ) de Plaxis en el coeficiente de atenuación geométrica ( $\gamma$ ) y el coeficiente de atenuación del material ( $\alpha$ ) del método empírico de Barkan. Esto fue posible analizando diferentes modelos con una geometría sencilla de suelo. Éstos se realizaron tomando una rigidez de 100 MPa, 1000 MPa y 10000 MPa además de una carga en superficie de 1 kN/m y 5 Hz de frecuencia. También fue realizado para el caso de un túnel a diferentes profundidades, pero considerando solamente una rigidez de 1000 MPa.

Se ha podido estudiar que  $\beta$  de Plaxis tiene una gran influencia en  $\gamma$  y  $\alpha$  de Barkan, mientras que  $\alpha$  de Plaxis no influye en estos parámetros. Para conocer su efecto se procedió a hacer graficas “ $\alpha$  y  $\beta$  de Plaxis” vs “ $\gamma$  y  $\alpha$  de Barkan” y así estudiar su comportamiento. Se pudo determinar que ante un cambio de rigidez y a medida que aumenta  $\beta$ , los coeficientes  $\gamma$  y  $\alpha$  de Barkan tienden a aumentar hasta un determinado valor.

En el caso de 100 MPa de rigidez, los coeficientes de Barkan estuvieron entre 1.30 - 2.41 (para  $\gamma$ ) y 0.002-0.02 (para  $\alpha$ ). Para 1000 MPa, los coeficientes  $\gamma$  y  $\alpha$  estuvieron entre 1.22-1.54 y 0.013- 0.017 respectivamente. Finalmente, para 10000 MPa de rigidez  $\gamma$  estuvo entre 1.26- 1.35 y  $\alpha$  entre 0.023- 0.037. Estos valores obtenidos, al ser comparados con los obtenidos experimentalmente, resultan habituales y parecen lógicos ante esta situación.

A partir de estos resultados se pudo encontrar una expresión que relaciona la rigidez con el  $\beta$  de Plaxis y permitió obtener gráficas de contorno relacionando dichos parámetros con los coeficientes de Barkan.

En el caso del túnel, los valores obtenidos resultaron muy aleatorios y no se pudo encontrar ninguna tendencia para los parámetros  $\gamma$  y  $\alpha$  de Barkan, probablemente por el efecto de la carga del túnel y las vibraciones transmitidas por el revestimiento. Esto lleva a concluir que la ecuación de Barkan no es válida para este tipo de problemas

Por otro lado se buscó analizar el efecto de las zanjas como método de reducción de vibraciones, estudiando zanjas con diferentes materiales de relleno y diferentes profundidades para una condición de carga en superficie y en profundidad. Éstas juegan un papel muy importante en la atenuación de vibraciones, llegándose a ver que mientras más profunda es, mayor atenuación presenta. También tiene gran influencia la frecuencia de la carga.



Ante una carga en superficie, las zanjas que presentaron mayor atenuación fueron las zanjas abiertas, llegando a atenuar entre 50% y 90% las vibraciones (para 25 metros de profundidad). Esto afirmó lo planteado en el acápite 2.3.2 de que las zanjas abiertas tienden a atenuar más las vibraciones. Cabe destacar que esto se realizó en modo de prueba ya que en la vida real no se pueden realizar zanjas abiertas tan profundas.

Las zanjas de concreto llegan a atenuar entre 20% y 30 % las vibraciones dependiendo de la frecuencia (para 15 y 25 metros de profundidad), llegando a ser muy útil para mitigar los efectos de éstas. La menor atenuación ocurrió en zanjas de 5 metros de profundidad (entre 10% y 20%). Por otro lado, la zanja de bentonita no resulta tan eficaz para atenuar vibraciones ya que para 5 metros las amplificó, mientras que para 15 metros y 25 metros, las atenuó entre 10 % y 20 %. La zanja del otro material no resulta tan útil para atenuar vibraciones, ya que según los resultados obtenidos, hubo una mínima atenuación para 5 metros de profundidad y sólo atenuó aproximadamente el 10% de éstas para 15 y 25 metros de profundidad.

En cuanto a la carga aplicada a 10 metros profundidad, se pudo determinar que igualmente la profundidad de la zanja es dominante en la atenuación de vibraciones. Las zanjas más eficaces son las zanjas abiertas. Éstas, para 5 metros de profundidad, presentaron una ligera atenuación para 5 Hz (menos de 5%) pero para 15 Hz y 25 Hz presentaron amplificación entre 10% y 50%. Para 15 metros de profundidad, atenuaron entre 20% a 80% dependiendo de la frecuencia y para 25 metros de profundidad atenuaron hasta 90%.

Las zanjas de bentonita, para 5 metros de profundidad reducen entre 10% y 20% las vibraciones mientras que para 15 metros y 25 metros las amplifican entre 10% y 30% dependiendo de la frecuencia. La zanja del otro material, igualmente reducen entre 5 y 10% las vibraciones. Para 15 metros y 25 metros de profundidad, dependiendo de la frecuencia amplifica las vibraciones.

Por otro lado, la zanja de concreto, para 15 metros y 25 metros de profundidad y 25 Hz de frecuencia, amplifican las vibraciones hasta 50% las vibraciones. Para 5 metros de profundidad, atenúa 20% de las vibraciones. Para 15 y 25 metros de profundidad exhibe un comportamiento parecido al amplificar las vibraciones hasta 50% para 25 Hz y atenuar entre 10% y 20% para 5 Hz y 15 Hz.

Cabe destacar que a partir de los resultados obtenidos, es importante saber que para elegir una zanja, es recomendable conocer la frecuencia y la profundidad de ésta, ya que estas condiciones son importantes en su eficacia.

Finalmente, Plaxis ha resultado útil para conocer el efecto de los coeficientes de Rayleigh en los coeficientes de Barkan. Además, ha permitido conocer el efecto que tienen las zanjas en la atenuación de vibraciones a pesar de que por lo general el planteamiento de este tipo de problemas está basado en conocimientos empíricos.

## Capítulo 6: Futuras líneas de investigación

A partir de los resultados arrojados por los modelos, se enumeran algunas propuestas para la realización de futuros trabajos de investigación:

1. Estudiar la ecuación de Barkan para diferentes condiciones de carga, que involucren la magnitud y la frecuencia de ésta, para así obtener una expresión general que relacione la frecuencia, la magnitud de la carga, la rigidez y los coeficientes de Rayleigh con los coeficientes de esta ecuación.
2. Analizar un modelo mediante una señal real que represente el paso de un tren (tanto en superficie como en un túnel) y comparar los resultados arrojados con el método empírico de Barkan.
3. Estudiar el efecto de las zanjas como método de reducción de vibraciones ante el paso del tren en un túnel, evaluando la profundidad y la distancia de ésta.
4. Estudiar el efecto de otros métodos de reducción de vibraciones, tanto en la fuente como en el receptor.
5. Optimizar el estudio de métodos de reducción de vibraciones considerando barreras pasivas o activas para atenuar el efecto de las vibraciones.
6. Realizar modelos reales de métodos de reducción de vibraciones y compararlos con los resultados obtenidos.

## Capítulo 7: Bibliografía

1. Adam, M., & Von Estorff, O. (2005). Reduction of train-induced building vibrations by using open and filled trenches. *Computers and Structures*, 83(1), 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.08.010>
2. Amick, H., & Gendreau, M. (2000). Construction Vibrations and Their Impact on Vibration-Sensitive Facilities. In *ASCE Construction Congress 6* (pp. 1–10). [https://doi.org/10.1061/40475\(278\)80](https://doi.org/10.1061/40475(278)80)
3. Barkan, D. D. (1962). *Dynamics of Bases and Foundations*. New York: McGraw-Hill Book Company.
4. Çelebi, E., & Göktepe, F. (2012). Non-linear 2-D FE analysis for the assessment of isolation performance of wave impeding barrier in reduction of railway-induced surface waves. *Construction and Building Materials*, 36, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.054>
5. Çelebi, E., & Kirtel, O. (2013). Non-linear 2-D FE modeling for prediction of screening performance of thin-walled trench barriers in mitigation of train-induced ground vibrations. *Construction and Building Materials*, 42, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.071>
6. Çelebi, E., Firat, S., Beyhan, G., Çankaya, İ., Vural, İ., & Kirtel, O. (2009). Field experiments on wave propagation and vibration isolation by using wave barriers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(5), 824–833. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.08.007>
7. Coulier, P., Dijckmans, A., Jiang, J., Thompson, D. J., Degrande, G., & Lombaert, G. (2015). Stiff wave barriers for the mitigation of railway induced vibrations. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, 126, 539–546. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-44832-8\\_63](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44832-8_63)
8. Eitzenberger, a. (2008). Inventory of geomechanical phenomena related to train-induced vibrations from tunnels. *Geotechnical Engineering*, 118. Retrieved from <http://epubl.ltu.se/1402-1757/2008/54/LTU-LIC-0854-SE.pdf>
9. Fernández Ruiz, J. (2014). Estudio numérico de vibraciones provocadas por el tráfico ferroviario en túneles en el dominio del tiempo: análisis geotécnico, validación experimental y propuesta de soluciones. Tesis doctoral.

10. Galván Adames, M. E. (2014). Análisis de la transmisión de vibraciones originadas en túneles utilizando el programa Plaxis. Tesis final de máster. Universidad Politécnica de Catalunya.
11. Galván Barrera, P. (2007). Análisis numérico y experimental de las vibraciones ocasionadas por el paso de trenes de alta velocidad en el suelo y en estructuras cercanas a la vía. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla.
12. Hall, L. (2003). Simulations and analyses of train-induced ground vibrations in finite element models. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 23(5), 403–413. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00209-9](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00209-9)
13. Kun, Y. (2016). I C Sv 23 Research Development of Subway Vibration, (July), 1–8. Retrieved from [https://www.iiav.org/archives\\_icsv\\_last/2016\\_icsv23/content/papers/papers/full\\_paper\\_651\\_20160427101346894.pdf](https://www.iiav.org/archives_icsv_last/2016_icsv23/content/papers/papers/full_paper_651_20160427101346894.pdf)
14. Matos Moquete, C.E (2015). Evaluación del efecto en edificaciones de las vibraciones producidas en túneles ferroviarios. Tesis final de máster. Universidad Politécnica de Catalunya.
15. Laera A, Brinkgreve RBJ. Site response analysis and liquefaction evaluation. *Plaxis bv*. 2015:1-42.
16. Plaxis B V. (2017). Plaxis 2D Reference manual, version 12.0
17. Sánchez, Á., Cardona, J., Genescà, M., & Pàmies, T. (2005). Propagación de vibraciones de trenes en el terreno, 43–40.
18. Wanga, R., & Martin, J. (2011). Efectos de las vibraciones generadas en túneles 708-TES-EG/CA-5233. Trabajo final de grado. Universidad Politecnica de Catalunya.

## Anexos

### Anexo A: Valores de Barkan para combinaciones de $\alpha$ y $\beta$ de Rayleigh. Carga en superficie.

Tabla 1. Combinación para 100 MPa

Carga en superficie			
$\alpha$ (Plaxis)	$\beta$ (Plaxis)	$\gamma$ (barkan)	$\alpha$ (barkan)
0.001	0.001	1.308	0.002
0.005	0.001	1.405	0.002
0.01	0.001	1.309	0.002
0.022	0.001	1.381	0.002
0.04	0.001	1.384	0.002
0.05	0.001	1.377	0.002
0.032	0.002	1.426	0.002
0.001	0.005	1.687	0.002
0.01	0.005	1.687	0.002
0.04	0.005	1.701	0.002
0.05	0.005	1.687	0.002
0.001	0.01	2.126	0.003
0.005	0.01	2.125	0.004
0.01	0.01	2.126	0.003
0.025	0.01	2.127	0.003
0.04	0.01	2.127	0.003
0.05	0.01	2.128	0.003
0.015	0.015	2.228	0.006
0.025	0.015	2.227	0.006
0.035	0.016	2.253	0.007
0.005	0.02	2.342	0.008
0.025	0.02	2.342	0.008
0.045	0.025	2.417	0.010
0.001	0.03	2.355	0.013
0.015	0.03	2.356	0.014
0.03	0.03	2.355	0.013
0.02	0.035	2.309	0.017
0.045	0.035	2.310	0.017
0.032	0.04	2.282	0.019
0.045	0.045	2.261	0.021
0.001	0.05	2.238	0.022
0.005	0.05	2.238	0.022
0.01	0.05	2.238	0.022

**Tabla 2. Combinación para 1000 MPa**

Carga en superficie			
$\alpha$ (Plaxis)	$\beta$ (Plaxis)	$\gamma$ (barkan)	$\alpha$ (barkan)
0.001	0.001	1.229	0.013
0.005	0.001	1.228	0.013
0.01	0.001	1.229	0.013
0.05	0.001	1.226	0.013
0.022	0.001	1.220	0.013
0.04	0.001	1.220	0.013
0.032	0.002	1.258	0.014
0.01	0.005	1.311	0.016
0.05	0.005	1.312	0.016
0.001	0.005	1.311	0.016
0.04	0.005	1.312	0.016
0.001	0.01	1.402	0.017
0.005	0.01	1.402	0.017
0.01	0.01	1.402	0.017
0.05	0.01	1.402	0.017
0.025	0.01	1.403	0.017
0.04	0.01	1.403	0.017
0.015	0.015	1.454	0.020
0.025	0.015	1.459	0.020
0.035	0.016	1.461	0.020
0.025	0.02	1.481	0.022
0.005	0.02	1.481	0.022
0.045	0.025	1.498	0.023
0.015	0.03	1.511	0.024
0.001	0.03	1.511	0.024
0.03	0.03	1.511	0.024
0.02	0.035	1.525	0.025
0.045	0.035	1.526	0.025
0.032	0.04	1.534	0.025
0.045	0.045	1.539	0.026
0.016	0.048	1.540	0.026
0.001	0.05	1.534	0.027
0.005	0.05	1.541	0.027
0.01	0.05	1.538	0.027

**Tabla 3. Combinación para 10000 MPa**

Carga en superficie			
$\alpha$ (Plaxis)	$\beta$ (Plaxis)	$\gamma$ (barkan)	$\alpha$ (barkan)
0.001	0.001	1.279	0.024
0.005	0.001	1.278	0.024
0.01	0.001	1.279	0.023
0.05	0.001	1.278	0.024
0.022	0.001	1.279	0.024
0.04	0.001	1.278	0.024
0.032	0.002	1.288	0.024
0.01	0.005	1.305	0.026
0.05	0.005	1.304	0.026
0.001	0.005	1.304	0.026
0.04	0.005	1.305	0.026
0.001	0.01	1.330	0.027
0.005	0.01	1.331	0.027
0.01	0.01	1.331	0.027
0.05	0.01	1.331	0.027
0.025	0.01	1.331	0.027
0.04	0.01	1.331	0.027
0.015	0.015	1.347	0.028
0.025	0.015	1.347	0.028
0.035	0.016	1.348	0.029
0.025	0.02	1.350	0.030
0.005	0.02	1.350	0.030
0.045	0.025	1.344	0.031
0.015	0.03	1.334	0.032
0.001	0.03	1.334	0.032
0.03	0.03	1.334	0.032
0.02	0.035	1.318	0.034
0.045	0.035	1.318	0.034
0.032	0.04	1.303	0.035
0.045	0.045	1.287	0.036
0.016	0.048	1.276	0.036
0.001	0.05	1.270	0.037
0.005	0.05	1.270	0.037
0.01	0.05	1.269	0.037

**Anexo B: Valores de Barkan para combinaciones de  $\alpha$  y  $\beta$  de Rayleigh.  
Paso de tren en túnel (1000 MPa).**

**Tabla 1. Túnel a 15 metros de profundidad**

$\alpha$ (Plaxis)	$\beta$ (Plaxis)	$\gamma$ (barkan)	$\alpha$ (barkan)
0.001	0.001	-1.690	0.135
0.01	0.001	-1.983	0.159
0.05	0.001	-2.659	0.125
0.01	0.01	-2.392	0.183
0.05	0.01	-2.857	0.172
0.001	0.01	-3.224	0.194
0.05	0.05	-11.170	0.452
0.01	0.05	-10.226	0.442
0.001	0.05	-8.922	0.472
0.001	0.005	-1.796	0.081
0.01	0.005	-3.804	0.154
0.04	0.005	-2.802	0.134
0.005	0.02	-5.989	0.305
0.025	0.02	-7.994	0.485
0.001	0.03	-5.617	0.341
0.015	0.03	-8.617	0.371
0.015	0.01	-4.635	0.258
0.015	0.015	-4.964	0.179
0.016	0.02	-8.633	0.257
0.02	0.03	-7.632	0.248
0.02	0.002	-2.462	0.150
0.025	0.04	-9.794	0.478
0.03	0.016	-3.579	0.149
0.03	0.001	-1.790	0.150
0.03	0.005	-2.487	0.238



**Tabla 2. Túnel a 30 metros de profundidad**

$\alpha$ (Plaxis)	$\beta$ (Plaxis)	$\gamma$ (barkan)	$\alpha$ (barkan)
0.001	0.001	1.492	0.064
0.01	0.01	3.446	0.017
0.05	0.05	-4.545	0.146
0.01	0.005	1.240	0.028
0.05	0.03	-3.588	0.134
0.001	0.02	-1.540	0.106
0.05	0.001	1.966	0.085
0.01	0.01	3.481	0.014
0.001	0.05	-3.504	0.185
0.001	0.005	1.519	0.048
0.01	0.03	-2.587	0.184
0.04	0.02	-1.789	0.146
0.005	0.005	2.205	0.058
0.025	0.001	2.029	0.057
0.001	0.01	4.012	0.015
0.015	0.05	-4.504	0.155
0.015	0.01	4.590	0.023
0.015	0.015	4.396	0.014
0.016	0.02	-1.608	0.170
0.02	0.03	-2.185	0.219
0.02	0.002	3.329	0.042
0.025	0.04	-3.697	0.114
0.03	0.016	5.396	0.015
0.03	0.001	3.033	0.082
0.03	0.005	1.807	0.034

**Tabla 3. Túnel a 45 metros de profundidad**

$\alpha$ (Plaxis)	$\beta$ (Plaxis)	$\gamma$ (barkan)	$\alpha$ (barkan)
0.001	0.001	21.735	-0.346
0.001	0.01	19.906	-0.257
0.001	0.05	9.652	-0.149
0.001	0.005	24.540	-0.363
0.001	0.03	15.205	-0.146
0.005	0.02	13.904	-0.153
0.01	0.001	22.429	-0.365
0.01	0.01	19.174	-0.372
0.01	0.05	9.138	-0.100
0.01	0.005	24.533	-0.382
0.015	0.03	16.204	-0.136
0.025	0.02	13.702	-0.183
0.04	0.005	21.675	-0.345
0.05	0.001	23.673	-0.345
0.05	0.01	18.906	-0.247
0.05	0.05	7.251	-0.079
0.015	0.01	13.562	-0.490
0.015	0.015	21.956	-0.120
0.016	0.02	13.161	-0.230
0.02	0.03	20.929	-0.152
0.02	0.002	8.652	-0.146
0.025	0.04	8.562	-0.312
0.03	0.016	17.956	-0.093
0.03	0.001	24.126	-0.395
0.03	0.005	23.257	-0.332

**Anexo C: Método de reducción de vibraciones. Medidas de las aceleraciones según el tipo de zanja y la frecuencia.**

**Tabla 1. Ajustes realizados para 100 MPa**

<b>E(Mpa)</b>	<b>Ln E</b>	<b><math>\alpha</math> (Plaxis)</b>	<b><math>\beta</math> (Plaxis)</b>	<b>log <math>\beta</math></b>	<b><math>\gamma</math>(barkan)</b>	<b><math>\gamma</math>(barkan) ajustado</b>	<b><math>\alpha</math>(barkan)</b>	<b><math>\alpha</math>(barkan) ajustado</b>
100	4.605	0.001	0.001	6.908	1.308	1.339	0.002	0.0021
100	4.605	0.005	0.001	6.908	1.405	1.339	0.002	0.0021
100	4.605	0.01	0.001	6.908	1.309	1.339	0.002	0.0021
100	4.605	0.022	0.001	6.908	1.381	1.339	0.002	0.0021
100	4.605	0.04	0.001	6.908	1.384	1.339	0.002	0.0021
100	4.605	0.05	0.001	6.908	1.377	1.339	0.002	0.0021
100	4.605	0.032	0.002	6.215	1.426	1.426	0.002	0.0021
100	4.605	0.001	0.005	5.298	1.687	1.687	0.002	0.0039
100	4.605	0.01	0.005	5.298	1.687	1.687	0.002	0.0039
100	4.605	0.04	0.005	5.298	1.701	1.687	0.002	0.0039
100	4.605	0.05	0.005	5.298	1.687	1.687	0.002	0.0039
100	4.605	0.001	0.01	4.605	2.126	2.024	0.003	0.0067
100	4.605	0.005	0.01	4.605	2.125	2.024	0.004	0.0067
100	4.605	0.01	0.01	4.605	2.126	2.024	0.003	0.0067
100	4.605	0.025	0.01	4.605	2.127	2.024	0.003	0.0067
100	4.605	0.04	0.01	4.605	2.127	2.024	0.003	0.0067
100	4.605	0.05	0.01	4.605	2.128	2.024	0.003	0.0067
100	4.605	0.015	0.015	4.200	2.228	2.228	0.006	0.0088
100	4.605	0.025	0.015	4.200	2.227	2.228	0.006	0.0088
100	4.605	0.035	0.016	4.135	2.253	2.256	0.007	0.0092
100	4.605	0.005	0.02	3.912	2.342	2.332	0.008	0.0106
100	4.605	0.025	0.02	3.912	2.342	2.332	0.008	0.0106
100	4.605	0.045	0.025	3.689	2.417	2.370	0.010	0.0121
100	4.605	0.001	0.03	3.507	2.355	2.367	0.013	0.0134
100	4.605	0.015	0.03	3.507	2.356	2.367	0.014	0.0134
100	4.605	0.03	0.03	3.507	2.355	2.367	0.013	0.0134
100	4.605	0.02	0.035	3.352	2.309	2.342	0.017	0.0146
100	4.605	0.045	0.035	3.352	2.310	2.342	0.017	0.0146
100	4.605	0.032	0.04	3.219	2.282	2.304	0.019	0.0156
100	4.605	0.045	0.045	3.101	2.261	2.261	0.021	0.0166
100	4.605	0.001	0.05	2.996	2.238	2.216	0.022	0.0175
100	4.605	0.005	0.05	2.996	2.238	2.216	0.022	0.0175
100	4.605	0.01	0.05	2.996	2.238	2.216	0.022	0.0175

**Tabla 2. Ajustes realizados para 1000 MPa**

<b>E(Mpa)</b>	<b>Ln E</b>	<b><math>\alpha</math> (Plaxis)</b>	<b><math>\beta</math> (Plaxis)</b>	<b>Ln <math>\beta</math></b>	<b><math>\gamma</math>(barkan)</b>	<b><math>\gamma</math>(barkan) ajustado</b>	<b><math>\alpha</math>(barkan)</b>	<b><math>\alpha</math>(barkan) ajustado</b>
1000	6.908	0.001	0.01	4.605	1.402	1.458	0.017	0.017
1000	6.908	0.001	0.05	2.996	1.534	1.487	0.027	0.028
1000	6.908	0.001	0.001	6.908	1.229	1.299	0.013	0.014
1000	6.908	0.005	0.01	4.605	1.402	1.458	0.017	0.017
1000	6.908	0.005	0.05	2.996	1.541	1.487	0.027	0.028
1000	6.908	0.005	0.001	6.908	1.228	1.299	0.013	0.014
1000	6.908	0.01	0.01	4.605	1.402	1.458	0.017	0.017
1000	6.908	0.01	0.05	2.996	1.538	1.487	0.027	0.028
1000	6.908	0.01	0.001	6.908	1.229	1.299	0.013	0.014
1000	6.908	0.05	0.001	6.908	1.226	1.299	0.013	0.014
1000	6.908	0.01	0.005	5.298	1.311	1.395	0.016	0.015
1000	6.908	0.05	0.005	5.298	1.312	1.395	0.016	0.015
1000	6.908	0.001	0.005	5.298	1.311	1.395	0.016	0.015
1000	6.908	0.05	0.01	4.605	1.402	1.458	0.017	0.017
1000	6.908	0.016	0.048	3.037	1.540	1.489	0.026	0.027
1000	6.908	0.025	0.02	3.912	1.481	1.502	0.022	0.021
1000	6.908	0.005	0.02	3.912	1.481	1.502	0.022	0.021
1000	6.908	0.015	0.03	3.507	1.511	1.507	0.024	0.024
1000	6.908	0.045	0.045	3.101	1.539	1.493	0.026	0.027
1000	6.908	0.04	0.005	5.298	1.312	1.395	0.016	0.015
1000	6.908	0.032	0.002	6.215	1.258	1.328	0.014	0.013
1000	6.908	0.045	0.025	3.689	1.498	1.507	0.023	0.023
1000	6.908	0.032	0.04	3.219	1.534	1.499	0.025	0.026
1000	6.908	0.025	0.01	4.605	1.403	1.458	0.017	0.017
1000	6.908	0.04	0.01	4.605	1.403	1.458	0.017	0.017
1000	6.908	0.022	0.001	6.908	1.220	1.299	0.013	0.014
1000	6.908	0.04	0.001	6.908	1.220	1.299	0.013	0.014
1000	6.908	0.035	0.016	4.135	1.461	1.492	0.020	0.020
1000	6.908	0.001	0.03	3.507	1.511	1.507	0.024	0.024
1000	6.908	0.03	0.03	3.507	1.511	1.507	0.024	0.024
1000	6.908	0.015	0.015	4.200	1.454	1.489	0.020	0.019
1000	6.908	0.02	0.035	3.352	1.525	1.504	0.025	0.025
1000	6.908	0.025	0.015	4.200	1.459	1.489	0.020	0.019
1000	6.908	0.045	0.035	3.352	1.526	1.504	0.025	0.025

**Tabla 3. Ajustes realizados para 10000 MPa**

<b>E(Mpa)</b>	<b>Ln E</b>	<b><math>\alpha</math> (Plaxis)</b>	<b><math>\beta</math> (Plaxis)</b>	<b>Ln <math>\beta</math></b>	<b><math>\gamma</math>(barkan)</b>	<b><math>\gamma</math>(barkan) ajustado</b>	<b><math>\alpha</math>(barkan)</b>	<b><math>\alpha</math>(barkan) ajustado</b>
10000	9.210	0.001	0.001	6.908	1.279	1.279	0.0236	0.0236
10000	9.210	0.005	0.001	6.908	1.278	1.279	0.0236	0.0236
10000	9.210	0.01	0.001	6.908	1.279	1.279	0.0235	0.0236
10000	9.210	0.05	0.001	6.908	1.278	1.279	0.0236	0.0236
10000	9.210	0.022	0.001	6.908	1.279	1.279	0.0237	0.0236
10000	9.210	0.04	0.001	6.908	1.278	1.279	0.0238	0.0236
10000	9.210	0.032	0.002	6.215	1.288	1.287	0.0242	0.0232
10000	9.210	0.01	0.005	5.298	1.305	1.301	0.0258	0.0245
10000	9.210	0.05	0.005	5.298	1.304	1.301	0.0257	0.0245
10000	9.210	0.001	0.005	5.298	1.304	1.301	0.0259	0.0245
10000	9.210	0.04	0.005	5.298	1.305	1.301	0.0257	0.0245
10000	9.210	0.001	0.01	4.605	1.330	1.312	0.0270	0.0268
10000	9.210	0.005	0.01	4.605	1.331	1.312	0.0267	0.0268
10000	9.210	0.01	0.01	4.605	1.331	1.312	0.0269	0.0268
10000	9.210	0.05	0.01	4.605	1.331	1.312	0.0268	0.0268
10000	9.210	0.025	0.01	4.605	1.331	1.312	0.0270	0.0268
10000	9.210	0.04	0.01	4.605	1.331	1.312	0.0269	0.0268
10000	9.210	0.015	0.015	4.200	1.347	1.317	0.0282	0.0287
10000	9.210	0.025	0.015	4.200	1.347	1.317	0.0282	0.0287
10000	9.210	0.035	0.016	4.135	1.348	1.318	0.0285	0.0290
10000	9.210	0.025	0.02	3.912	1.350	1.320	0.0296	0.0303
10000	9.210	0.005	0.02	3.912	1.350	1.320	0.0296	0.0303
10000	9.210	0.045	0.025	3.689	1.344	1.320	0.0310	0.0317
10000	9.210	0.015	0.03	3.507	1.334	1.320	0.0323	0.0329
10000	9.210	0.001	0.03	3.507	1.334	1.320	0.0323	0.0329
10000	9.210	0.03	0.03	3.507	1.334	1.320	0.0323	0.0329
10000	9.210	0.02	0.035	3.352	1.318	1.320	0.0335	0.0340
10000	9.210	0.045	0.035	3.352	1.318	1.320	0.0336	0.0340
10000	9.210	0.032	0.04	3.219	1.303	1.319	0.0348	0.0349
10000	9.210	0.045	0.045	3.101	1.287	1.318	0.0359	0.0359
10000	9.210	0.016	0.048	3.037	1.276	1.318	0.0363	0.0364
10000	9.210	0.001	0.05	2.996	1.270	1.317	0.0369	0.0367
10000	9.210	0.005	0.05	2.996	1.270	1.317	0.0369	0.0367
10000	9.210	0.01	0.05	2.996	1.269	1.317	0.0369	0.0367

**Anexo D: Método de reducción de vibraciones. Medidas de las aceleraciones según el tipo de zanja y la frecuencia.**

**Tabla 1. Carga en superficie**

Material	5 metros	15 metros	25 metros	Frecuencia
<b>Sin zanja</b> <b>m/s<sup>2</sup></b>	8.31E-05	8.31E-05	8.31E-05	5 Hz
	7.04E-05	7.04E-05	7.04E-05	15 Hz
	5.46E-05	5.46E-05	5.46E-05	25 Hz
<b>Bentonita</b> <b>m/s<sup>2</sup></b>	8.48E-05	7.73E-05	7.56E-05	5 Hz
	7.32E-05	5.29E-05	6.73E-05	15 Hz
	5.65E-05	5.28E-05	5.34E-05	25 Hz
<b>Otro material</b> <b>m/s<sup>2</sup></b>	8.26E-05	8.14E-05	8.09E-05	5 Hz
	7.08E-05	6.58E-05	6.47E-05	15Hz
	5.63E-05	5.08E-05	4.93E-05	25 Hz
<b>Concreto m/s<sup>2</sup></b>	6.89E-05	6.85E-05	6.82E-05	5 Hz
	5.53E-05	4.90E-05	4.84E-05	15 Hz
	4.55E-05	3.46E-05	3.36E-05	25 Hz
<b>Zanja abierta</b> <b>m/s<sup>2</sup></b>	8.25E-05	6.16E-05	3.98E-05	5 Hz
	6.22E-05	2.17E-05	6.96E-06	15 Hz
	4.51E-05	8.10E-06	1.04E-06	25 Hz

**Tabla 2. Carga profundidad.**

Material	5 metros	15 metros	25 metros	Frecuencia
<b>Sin zanja</b> <b>m/s<sup>2</sup></b>	9.31E-05	9.31E-05	9.31E-05	5 Hz
	6.98E-05	6.98E-05	6.98E-05	15 Hz
	2.56E-05	2.56E-05	2.56E-05	25 Hz
<b>Bentonita</b> <b>m/s<sup>2</sup></b>	9.45E-05	8.81E-05	8.60E-05	5 Hz
	7.21E-05	6.59E-05	6.60E-05	15 Hz
	2.72E-05	2.44E-05	2.50E-05	25 Hz
<b>Otro material</b> <b>m/s<sup>2</sup></b>	9.14E-05	9.15E-05	9.05E-05	5 Hz
	6.59E-05	7.34E-05	7.04E-05	15Hz
	2.13E-05	3.34E-05	2.97E-05	25 Hz
<b>Concreto m/s<sup>2</sup></b>	7.50E-05	7.71E-05	7.68E-05	5 Hz
	5.30E-05	6.72E-05	6.77E-05	15 Hz
	2.05E-05	3.91E-05	3.88E-05	25 Hz
<b>Zanja abierta</b> <b>m/s<sup>2</sup></b>	9.26E-05	7.25E-05	4.74E-05	5 Hz
	7.31E-05	3.41E-05	1.15E-05	15 Hz
	3.92E-05	1.70E-05	2.39E-06	25 Hz